



**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA EN VIALIDAD Y TRANSPORTES  
II COHORTE**

**Análisis de respuestas mecánicas de los pavimentos  
rígidos colocados en las vías urbanas del cantón  
Cuenca**

*TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE MAGISTER EN INGENIERÍA  
EN VIALIDAD Y TRANSPORTE*

**AUTOR:** Ing. Carlos Manuel Lituma Vintimilla  
CI: 0102987450

**DIRECTOR:** Ing. Jaime Asdrúbal Bojorque Ñeguez, PhD.  
CI: 0102857885

Cuenca – Ecuador  
2018



# **Análisis de respuestas mecánicas de los pavimentos rígidos colocados en las vías urbanas del cantón Cuenca**

Ing. Carlos Manuel Lituma Vintimilla  
Abril del 2018

## **Resumen**

En este trabajo se determinaron los esfuerzos y deformaciones que se producen en las losas de los pavimentos rígidos, con la finalidad de analizar su comportamiento estructural y proveer información sobre parámetros críticos a ser considerados en los diseños y construcción. Para esto se modelaron diferentes escenarios en el programa de elementos finitos KenSlabs, cuyos datos de entrada fueron obtenidos de la información recopilada en la bibliografía, diseños, memorias, especificaciones técnicas y procesos constructivos propios de las vías urbanas del cantón Cuenca. Se determinó que más del 70% de las vías analizadas tienen un CBR de subrasante comprendido entre el 2 y 4%, con un módulo de reacción de la subrasante-subbase promedio de 42.5 MPa/m, sobre la cual están apoyadas losas de dimensiones menores a 3.50 m y espesores que varían entre 16.0 y 22 cm. Del análisis de resultados, para las posibles ubicaciones de las cargas vehiculares sobre la losa, se determinó que los mayores esfuerzos y deformaciones son producidos por un eje simple dual de 11.0 toneladas sobre las juntas del pavimento. Debido a la falta de información en la región sobre las variaciones de temperatura en las losas no fue posible evaluar el desempeño de los pavimentos para esfuerzos combinados por cargas y gradiente térmico. Con los esfuerzos y deformaciones obtenidos en la modelación y aplicando los criterios desarrollados por la PCA para el deterioro por fatiga y erosión se determinó un espesor de losa de 19.5 para vías locales, 20.5 cm para vías colectoras, y 22.0 cm para vías arteriales. Comparando con los diseños recolectados, se identifica que en vías locales debería incrementarse el espesor, sin embargo, las vías construidas no presentan mayores deterioros, lo cual podría indicar que algunos parámetros como el tráfico están sobrestimados, y otros como los módulos de los materiales y resistencias del concreto son mayores a los considerados en los diseños, permitiendo estar del lado de la seguridad.

Palabras clave: pavimento rígido, vías urbanas, respuestas mecánicas, modelos de deterioro



## Abstract

This study analyses the stress and deformations occurring in the slabs of rigid pavements in order to understand their structural behavior. Additionally, it provides information on critical parameters to be considered in design and construction. Different situations were modeled in the finite element program KenSlabs, whose input data was obtained from the information collected in the bibliography, designs, memories, technical specifications and construction processes of the urban roads of Cuenca city. It was determined that more than 70% of the analyzed streets have a CBR of subgrade between 2 and 4%, with an average subgrade-subbase reaction modulus of 42.5 MPa/m, on which slabs of smaller dimensions are supported at 3.50 m and thicknesses that vary between 16.0 and 22 cm. The analysis of results for the possible locations of the vehicular loads on the slab, showed that the greatest stress and deformations are produced by a dual simple axis of 11.0 tons on the pavement joints. Because of the lack of information in the region about temperature variations in slabs, it was not possible to evaluate the performance of the pavements for combined loads and thermal gradient. With the stress and deformations obtained in the modeling and applying the criteria developed by the PCA for distress due to fatigue and erosion, a slab thickness of 19.5 was determined for local roads, 20.5 cm for collector roads, and 22.0 cm for arterial roads. Comparing these with the collected designs, it is identified that on local roads the thickness should be increased; however, the constructed roads do not present major distress, which indicates that some parameters such as traffic are overestimated, and others like the modules of the materials and resistances of concrete are greater than those considered in the designs, allowing to be on the side of safety.

keywords: rigid pavements, urban roads, mechanical responses, distress models



## Tabla de Contenidos

1	Generalidades.....	15
1.1	Introducción .....	15
1.2	Antecedentes .....	16
1.3	Justificación .....	17
1.4	Planteamiento del problema.....	17
1.5	Objetivos .....	18
1.5.1	Objetivo General .....	18
1.5.2	Objetivos Específicos.....	18
1.6	Alcance .....	19
1.7	Limitaciones.....	20
2	Marco Teórico.....	21
2.1	Evolución de los métodos de diseño de pavimentos.....	21
2.2	Pavimentos Rígidos .....	23
2.3	Esfuerzos y deflexiones en pavimentos rígidos .....	26
2.3.1	Esfuerzos debidos a cambios de temperatura y/o humedad.....	26
2.3.2	Esfuerzos y deformaciones debido a cargas .....	30
2.3.2.1	Cargas de esquina .....	31
2.3.2.2	Cargas en el interior .....	32
2.3.2.3	Cargas de borde.....	33
2.4	Juntas de pavimentos rígidos y transferencia de cargas.....	34
2.4.1	Eficiencia de transferencia de carga en juntas .....	34
2.5	Métodos de diseño de pavimentos rígidos .....	36
2.5.1	Método AASHTO 93.....	37
2.5.2	Método de la PCA.....	41
2.5.2.1	Análisis de fatiga.....	41
2.5.2.2	Análisis de erosión .....	46
2.5.3	Método ME-PDG.....	50
2.5.3.1	Ecuaciones de predicción de deterioro para el agrietamiento transversal ...	55
2.6	Métodos de elementos finitos para el análisis de pavimentos rígidos .....	58
2.6.1	Respuestas del modelo estructural de pavimentos rígidos.....	59
2.6.2	Software KENSLABS. ....	60
3	Determinación de parámetros a utilizarse en la modelación .....	64
3.1	Geometría de vías .....	64
3.1.1	Secciones transversales y dimensiones de losas .....	65
3.1.2	Espesores de capas que conforman las estructuras de pavimentos.....	69
3.2	Propiedades de los materiales .....	70
3.2.1	Capa de subrasante.....	71
3.2.2	Capa de subbase .....	74
3.2.3	Losa de concreto .....	78
3.3	Cargas de tráfico y medioambientales .....	79
3.3.1	Tráfico y Cargas.....	80
3.3.1.1	Tipos de vehículos .....	80
3.3.1.2	Número de repeticiones de carga aplicadas durante el periodo de diseño...83	
3.3.1.3	Áreas de contacto de los neumáticos .....	86
3.3.1.4	Ubicación de las cargas.....	89
3.3.2	Gradiente térmico en losas de pavimentos rígidos .....	90
3.4	Eficiencia en la transferencia de cargas (LTE) .....	92



3.4.1	Juntas Longitudinales.....	93
3.4.2	Juntas Transversales.....	94
3.5	Sistema de losas y elementos finitos a utilizarse en la modelación.....	96
4	Cálculo y análisis de resultados obtenidos en la modelación .....	98
4.1	Esfuerzos en la mitad de las losas (entre juntas transversales).....	99
4.1.1	Esfuerzos en la mitad de las losas por acción de cargas vehiculares.....	99
4.1.2	Esfuerzos en la mitad de las losas por acción del gradiente térmico.....	105
4.2	Esfuerzos en los extremos de la losas (en las juntas transversales).....	109
4.2.1	Esfuerzos en los extremos de las losas por acción de cargas vehiculares .....	109
4.2.2	Esfuerzos en los extremos de las losas por acción del gradiente térmico.....	112
4.3	Deformaciones en la mitad de las losas (entre juntas transversales) .....	114
4.3.1	Deformaciones en la mitad de las losas por acción de cargas vehiculares .....	114
4.3.2	Deformaciones en la mitad de las losas por acción del gradiente térmico .....	116
4.4	Deformaciones en los extremos de las losas (en las juntas transversales).....	117
4.4.1	Deformaciones en los extremos de las losas por acción de cargas vehiculares.117	
4.4.2	Deformaciones en los extremos de las losas por acción del gradiente térmico.120	
4.5	Análisis de sensibilidad de los parámetros utilizados en la modelación .....	123
4.5.1	Análisis de sensibilidad para los esfuerzos de borde .....	124
4.5.2	Análisis de sensibilidad para las deformaciones de esquina.....	127
4.6	Determinación de espesores de losa utilizando funciones de transferencia de deterioro con los resultados obtenidos en la modelación.....	130
4.6.1	Análisis del espesor requerido por fatiga.....	131
4.6.2	Análisis del espesor requerido por erosión .....	135
4.6.3	Análisis para vías arteriales .....	140
4.7	Evaluación del desempeño de la estructura del pavimento utilizando modelos de deterioro por fatiga con los resultados obtenidos .....	140
5	Conclusiones y Recomendaciones .....	143
5.1	Conclusiones .....	143
5.2	Recomendaciones .....	146
6	Lista de referencias .....	148
7	Anexos .....	150



## Lista de tablas

Tabla 2.1. Valores referenciales de parámetros del concreto sugeridos para el cálculo de esfuerzos y deformaciones en pavimentos rígidos.....	36
Tabla 2.2. Niveles de confiabilidad sugeridos según la clasificación funcional de la vía (AASHTO, 1993).....	39
Tabla 2.3. Desviación normal estándar para varios niveles de confiabilidad (AASHTO, 1993) .....	39
Tabla 2.4. Coeficiente de transferencia de carga, J (AASHTO, 1993).....	40
Tabla 2.5. Valores recomendados de los coeficientes de drenaje, $C_d$ (AASHTO, 1993).....	40
Tabla 2.6 Resumen de programas de elementos finitos disponibles para el análisis de pavimentos rígidos .....	58
Tabla 3.1. Clasificación y características de las vías urbanas del cantón Cuenca .....	64
Tabla 3.2. Dimensiones típicas de las losas (o paños) según el ancho del carril de circulación .....	69
Tabla 3.3. Especificaciones técnicas para material de subbase contempladas en los diseños .....	75
Tabla 3.4. Tablas para determinar el módulo de reacción combinado en el método de la PCA (Packard, 1984).....	77
Tabla 3.5 Módulos de Reacción Combinados de Subrasante-Subbase considerados en los diseños.....	77
Tabla 3.6. Valores de los parámetros del concreto de cemento portland utilizados en la modelación.....	79
Tabla 3.7. Número pronosticado de repeticiones de carga en vías arteriales .....	84
Tabla 3.8. Número pronosticado de repeticiones de carga en vías colectoras.....	84
Tabla 3.9. Número pronosticado de repeticiones de carga en vías locales.....	85
Tabla 3.10. Número pronosticado de repeticiones de ejes de carga (por vehículo) aplicadas durante el período de diseño en vías colectoras y locales.....	86
Tabla 3.11. Número pronosticado de repeticiones de ejes de carga aplicadas durante el período de diseño en vías colectoras y locales.....	86
Tabla 3.12. Cálculo de áreas de contacto de forma rectangular para cada tipo de eje .....	88
Tabla 3.13. Cálculo de áreas de contacto de forma circular para ejes simples duales de 8.2 y 11.0 Ton .....	88
Tabla 3.14. Gradientes térmicos promedios sugeridos por Huang para losas de pavimentos rígidos .....	91
Tabla 3.15. Eficiencia en la transferencia de carga (LTE) según el tipo de soporte de borde del pavimento.....	93
Tabla 3.16. Dimensiones de los elementos utilizados durante la modelación.....	97
Tabla 4.1. Esfuerzos máximos (en x-x) que se producen en la mitad de las losas por la acción de cargas.....	100
Tabla 4.2. Esfuerzos máximos (en y-y) que se producen en la mitad de las losas por la acción de cargas.....	100
Tabla 4.3. Esfuerzos máximos (en x-x) que se producen en la mitad de las losas debido al gradiente térmico .....	105
Tabla 4.4. Esfuerzos máximos (en y-y) que se producen en la mitad de las losas debido al gradiente térmico .....	106
Tabla 4.5. Esfuerzos máximos (en y-y) que se producen en los extremos de las losas por acción de cargas .....	109
Tabla 4.6. Esfuerzos máximos (en y-y) que se producen en los extremos de las losas debido al gradiente térmico .....	112



Tabla 4.7. Deformaciones máximas que se producen en la mitad de las losas bajo la acción de cargas .....	114
Tabla 4.8. Deformaciones que se producen en la mitad de las losas por la acción del gradiente térmico .....	116
Tabla 4.9. Deformaciones máximas que se producen en el extremo de las losas bajo la acción de cargas.....	118
Tabla 4.10. Deformaciones que se producen en los extremos de las losas por la acción del gradiente térmico .....	122
Tabla 4.11. Funciones de transferencia (Modelos de deterioro para el agrietamiento por fatiga) .....	133
Tabla 4.12. Esfuerzos y daño por fatiga en losas de 3x3 y 20.5 cm de espesor por tráfico de vías colectoras .....	134
Tabla 4.13. Esfuerzos y daño por fatiga en losas de 3x3 y 19.5 cm de espesor por tráfico de vías locales .....	135
Tabla 4.14. Funciones de transferencia o modelo de deterioro por erosión de la PCA (Packard, 1984) .....	136
Tabla 4.15. Deformaciones y daño por erosión en losas de 3x3 y 20.5 cm de espesor por tráfico de vías colectoras.....	139
Tabla 4.16. Deformaciones y daño por erosión en losas de 3x3 y 19.5 cm de espesor por tráfico de vías locales.....	139
Tabla 7.1. Comparación entre los resultados de la modelación en KenSlabs y los obtenidos con las fórmulas de Westergaard para un eje simple dual de 11.0 toneladas. ....	150
Tabla 7.2. Comparación entre los resultados de la modelación en KenSlabs y los obtenidos con las cartas de Bradbury para un gradiente térmico de 12.2°C .....	151
Tabla 7.3. Esfuerzos obtenidos del análisis de sensibilidad .....	156
Tabla 7.4. Deformaciones obtenidas del análisis de sensibilidad.....	157



## Lista de figuras

Figura 2.1. Cimentación de Winkler.....	23
Figura 2.2. Sección transversal típica de un pavimento rígido. ....	24
Figura 2.3. Tipos de pavimentos rígidos (Huang, 2004b) .....	25
Figura 2.4. Alabeo de losas debido al gradiente térmico (Huang, 2004b).....	27
Figura 2.5. Deformaciones por gradiente de temperatura en una losa de concreto (Huang, 2004b) .....	27
Figura 2.6. Losa de dimensiones finitas (Huang, 2004b) .....	28
Figura 2.7. Factor de corrección de esfuerzos por gradiente térmico en losas finitas (Huang, 2004b) .....	29
Figura 2.8. Posiciones de carga analizadas por Westergaard .....	30
Figura 2.9. Transferencia de corte a través de una junta mediante trabazón de agregados (Huang, 2004b) .....	35
Figura 2.10. Posición crítica de la carga para el análisis por fatiga (Huang, 2004b) .....	42
Figura 2.11. Posición crítica de la carga para el análisis de erosión (Huang, 2004b) .....	46
Figura 2.12. Diagrama de flujo del procedimiento utilizado para el diseño de pavimentos en la ME-PDG (Vivanco, 2016) .....	51
Figura 2.13. Comparación de porcentajes medidos y pronosticados de losas agrietadas (AASHTO, 2008).....	57
Figura 3.1. Anchos típicos de carriles de circulación de vías arteriales, colectoras y locales .65	
Figura 3.2. Ejemplos de secciones transversales típicas de vías con pavimento rígido en Cuenca.....	66
Figura 3.3. Dimensiones típicas de las losas de pavimento rígido .....	68
Figura 3.4. Estructuras típicas de pavimentos rígidos consideradas en los diseños .....	70
Figura 3.5. Ensayo de carga de placa para determinar el módulo de reacción de la subrasante (Huang, 2004b) .....	71
Figura 3.6. Valores de CBR de subrasante considerados en los diseños .....	72
Figura 3.7. Valores del módulo de reacción de la subrasante (k) considerados en los diseños de vías .....	74
Figura 3.8. Correlaciones entre diferentes parámetros de subbases (AASHTO, 1993) .....	76
Figura 3.9. Carta para determinar el módulo de reacción combinado (AASHTO, 1993) .....	76
Figura 3.10 Valores del módulo de reacción de la subrasante-subbase ( $k_{\text{combinado}}$ ) considerados en los diseños de vías .....	78
Figura 3.11. Tipos de vehículos considerados en los diseños y configuración de ejes .....	82
Figura 3.12. Configuración de ejes utilizados en la modelación (distancias en cm) .....	83
Figura 3.13. Formas del área de contacto entre el neumático y el pavimento (Huang, 2004b) .....	87
Figura 3.14. Área del círculo equivalente para neumáticos duales (Huang, 2004b) .....	88
Figura 3.15. Factor $f_3$ para el cálculo del esfuerzo equivalente (Packard, 1984) .....	90
Figura 3.16. Diferencias usuales de temperatura entre la superficie y la base de la losa (Vargas, 2016).....	92
Figura 3.17. Junta longitudinal de construcción típica en vías urbanas de la ciudad de Cuenca .....	93
Figura 3.18. Juntas transversales típicas en vías urbanas de la ciudad de Cuenca.....	94
Figura 3.19. Configuración de losas y elementos finitos utilizados en la modelación .....	96
Figura 4.1. Posiciones de carga analizadas .....	98
Figura 4.2. Puntos de cálculo de esfuerzos en la mitad de la losa .....	99





Figura 4.3. Esfuerzos producidos en la dirección x-x (longitudinales) en la mitad de una losa de 3x3 por un eje de 11.0 tn. ....	101
Figura 4.4. Esfuerzos producidos en la dirección x-x (longitudinales) en la mitad de una losa de 3x3 por un eje de 11.0 tn ubicado en el borde, centro y junta longitudinal. ....	103
Figura 4.5. Esfuerzos producidos en la dirección y-y (transversales) en la mitad de una losa de 3x3 por un eje de 11.0 tn. ....	105
Figura 4.6. Esfuerzos producidos en la dirección x-x (longitudinales) en la mitad de una losa de 3x3 por el gradiente térmico. ....	107
Figura 4.7. Esfuerzos producidos en la dirección y-y (transversales) en la mitad de una losa de 3x3 por el gradiente térmico. ....	107
Figura 4.8 Puntos de cálculo de esfuerzos en los extremos de la losa analizada (en la junta transversal).....	109
Figura 4.9. Esfuerzos producidos en la dirección y-y (transversales) por un eje de 11.0 ton en el extremo de una losa de 3x3.....	110
Figura 4.10. Esfuerzos producidos en la dirección y-y por un eje de 11.0 ton. en el extremo de una losa de 3x3 a 0, 70 y 125 cm desde el bordillo. ....	112
Figura 4.11. Esfuerzos producidos en la dirección y-y (transversales) en el extremo de una losa de 3x3 por el gradiente térmico. ....	113
Figura 4.12. Posición de la carga para el cálculo de deformaciones en la mitad de la losa ..	114
Figura 4.13. Deformaciones producidas en la mitad de la losa para una carga sobre la junta longitudinal .....	115
Figura 4.14. Deformaciones por gradiente térmico en la mitad de la losa .....	116
Figura 4.15. Posición de la carga para el cálculo de deformaciones en el extremo de la losa .....	118
Figura 4.16. Deformaciones producidas en el extremo de la losa para una carga sobre la junta longitudinal .....	120
Figura 4.17. Deformaciones por gradiente térmico en el extremo de losa .....	122
Figura 4.18. Posiciones de carga utilizadas para el análisis de sensibilidad.....	124
Figura 4.19. Esfuerzos de borde (sobre la junta longitudinal) en losas de 3x3 y un k de 30 MPa/m.....	125
Figura 4.20. Esfuerzos de borde (sobre la junta longitudinal) en losas de 3x3 y un k de 40 MPa/m.....	125
Figura 4.21. Esfuerzos de borde (sobre la junta longitudinal) en losas de 3x3 y un k de 50 MPa/m.....	126
Figura 4.22. Esfuerzos de borde (sobre la junta longitudinal) en losas de 3x3 y un k de 60 MPa/m.....	126
Figura 4.23. Deformaciones de esquina (junta longitudinal-junta transversal) en losas de 3x3 y un k de 30 MPa/m .....	128
Figura 4.24. Deformaciones de esquina (junta longitudinal-junta transversal) en losas de 3x3 y un k de 40 MPa/m .....	128
Figura 4.25. Deformaciones de esquina (junta longitudinal-junta transversal) en losas de 3x3 y un k de 50 MPa/m .....	129
Figura 4.26. Deformaciones de esquina (junta longitudinal-junta transversal) en losas de 3x3 y un k de 60 MPa/m .....	129
Figura 4.27. Funciones de transferencia para calcular el número de repeticiones de carga permisibles por fatiga.....	132
Figura 4.28. Funciones de transferencia para calcular el número de repeticiones de carga permisibles por erosión .....	136



Figura 4.29. Resultados para el desempeño de vías colectoras con el modelo de deterioro de la ME-PDG (AASHTO 2008) .....	141
Figura 4.30. Resultados para el desempeño de vías colectoras con el modelo de deterioro de Lanname (Universidad de Costa Rica) .....	142
Figura 7.1. Capturas de pantalla de los resultados obtenidos en KenSlabs durante la modelación de un eje simple dual de 11.0 toneladas en la mitad de una losa de 3x3 sobre la junta longitudinal .....	152



### Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Carlos Manuel Lituma Vintimilla en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "**Análisis de respuestas mecánicas de los pavimentos rígidos colocados en las vías urbanas del cantón Cuenca**", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 16 de mayo del 2018

---

Carlos Manuel Lituma Vintimilla

C.I: 010298745-0



### Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Carlos Manuel Lituma Vintimilla, autor del trabajo de titulación **“Análisis de respuestas mecánicas de los pavimentos rígidos colocados en las vías urbanas del cantón Cuenca”**, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 18 de mayo del 2018

---

Carlos Manuel Lituma Vintimilla

C.I: 010298745-0



---

## **Dedicatoria**

Este trabajo está dedicado a mi esposa e hijas, por ser la razón que me impulsa a superarme día tras día, haciendo que todo esfuerzo valga la pena.

A mis padres, que siempre han estado presentes con su ejemplo y apoyo incondicional para ayudarme a lograr mis objetivos.

Carlos Lituma V.



---

## Agradecimientos

A la Universidad de Cuenca, por darnos la oportunidad de mejorar y actualizar nuestros conocimientos, formando profesionales útiles a la sociedad.

Al Doctor Jaime Bojorque I. por todo el apoyo y la dedicación para sacar adelante este proyecto.

A la Unidad Ejecutora de Proyectos del GAD de Cuenca, en la persona del Ing. Álvaro Vintimilla por la apertura y facilidades brindadas para la realización de este trabajo.

A todos mis compañeros, amigos y familiares, con los que siempre he podido contar para alcanzar esta nueva meta.

Carlos Lituma V.



## 1 Generalidades

### 1.1 Introducción

Los métodos empíricos para el diseño de pavimentos siguen siendo hasta la actualidad ampliamente utilizados para determinar la estructura de un pavimento. La gran mayoría de las vías construidas en nuestro país han sido diseñadas de acuerdo a estos métodos, como el de la AASHTO 1993, cuyas ecuaciones están basadas en los resultados de pruebas de carreteras de Estados Unidos de Norteamérica.

Una de las principales desventajas de un método empírico es que sólo se puede aplicar a un conjunto de condiciones ambientales, materiales y de carga en el que fue obtenido. Si se cambian estas condiciones, el diseño podría no ser válido, y se debería desarrollar un nuevo método para estar conforme con las nuevas condiciones (Huang, 2004b).

La tendencia actual apunta hacia los métodos de diseño mecanicistas-empíricos. Las metodologías mecanicistas pretenden tener un enfoque puramente científico, con un marco teórico suficiente que permita el análisis completo de la mecánica del comportamiento de un pavimento ante las acciones del clima y del tránsito vehicular, y su posterior correlación con experiencias en el desempeño observado en laboratorio o en campo. Esta metodología permitiría la predicción correcta de la evolución en el tiempo de los diferentes deterioros que se pudieran presentar y, por ende, aumentar en gran medida la confiabilidad de los diseños (Garnica & Correa, 2004).

Algunos métodos mecanicistas-empíricos como el desarrollado por la PCA (Packard, 1984), pretenden relacionar el daño observado en los pavimentos con los esfuerzos y deformaciones que se producen sobre la estructura.

La más reciente guía de diseño de estructuras de pavimentos ME-PDG (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide) de la AASHTO (2008), se basa en las respuestas



(esfuerzos y deformaciones) de los pavimentos sometidos a cargas de tránsito y condiciones medio ambientales específicas de los sitios donde serán construidas, y que asociadas a ecuaciones de deterioro, pretenden evaluar si el diseño propuesto de un pavimento le permite tener un desempeño adecuado durante su funcionamiento. Los principales criterios considerados en el ME-PEG para evaluar el desempeño de pavimentos de concreto simple con juntas, denominados JPCP, por sus siglas en inglés, (Jointed Plain Concrete Pavements), son el agrietamiento de losas (cracking), el escalonamiento de juntas (faulting) y el índice de rugosidad o regularidad internacional (IRI). Los costos y el tiempo necesario para el empleo de este método son muy altos por lo que los métodos tradicionales siguen siendo ampliamente utilizados.

## 1.2 Antecedentes

Desde el año 2003 las administraciones municipales que han estado al frente del cabildo cuencano se han planeado programas para el desarrollo de sus barrios, tratando de mejorar la cobertura, calidad y cantidad de los servicios públicos proporcionados por la Municipalidad y sus empresas, buscando así una mejora en la calidad de vida de sus habitantes. Estos programas, financiados con recursos propios y fondos obtenidos de créditos con instituciones financieras, han sido invertidos en las parroquias de la ciudad a través de infraestructura básica, servicios de salud y seguridad pública, permitiendo el desarrollo local, social, económico y vial de la ciudad.

Según el Plan de Movilidad de Cuenca 2015-2025 (GAD Municipal de Cuenca, 2015a), aproximadamente un 42% de las vías en la parte urbana de la ciudad cuenta con pavimento rígido. De acuerdo a la información proporcionada por la Unidad Ejecutora de Proyectos del GAD de Cuenca, solo en el año 2016, como parte del programa Barrio Para Mejor Vivir que ejecuta la Alcaldía de Cuenca, se han mejorado con pavimento rígido unas doscientas calles





de la ciudad, con una longitud aproximada de veinte y dos kilómetros lineales y una inversión que bordea los veinte millones seiscientos mil dólares, involucrando durante su diseño, construcción y fiscalización alrededor de doscientos sesenta profesionales. Este programa es financiado con un crédito de sesenta millones de dólares del Banco para el Desarrollo de América Latina (CAF) y una contraparte municipal de veinte y cinco millones de dólares (El Telégrafo, 2015). Por lo tanto, todo aporte que permita optimizar y conservar las fuertes inversiones que se realizan en infraestructura vial debe ser considerado como una prioridad dentro de la ingeniería de pavimentos.

### **1.3 Justificación**

Este trabajo pretende determinar y analizar las respuestas mecánicas de los pavimentos rígidos construidos en las vías urbanas del cantón Cuenca. En la actualidad se vienen realizando los diseños de estos tipos de pavimentos a través de métodos empíricos como el de la AASHTO 93. Si bien los resultados han sido satisfactorios, muchas veces los mecanismos de falla que consideran estos métodos son subestimados, causando posibles problemas en el desempeño del pavimento. De ahí, se busca brindar mayores elementos de juicio para que los profesionales consideren los efectos de los esfuerzos, deformaciones y deterioro en el diseño de los pavimentos. Se realiza un análisis de los diferentes parámetros de diseño sobre las respuestas estructurales que se producen en las losas de pavimento; además, se evalúa la influencia que tienen las diferentes cargas, características de materiales y procesos constructivos comúnmente utilizados en nuestra ciudad.

### **1.4 Planteamiento del problema**

En nuestro país, los métodos empíricos como el de la AASHTO 93, utilizados para el diseño de estructuras de pavimentos, en su mayoría han tenido resultados satisfactorios, pero



existen algunas vías que han sufrido un deterioro prematuro, afectando su desempeño. Aunque estos métodos consideran el efecto de varios factores en el comportamiento del pavimento, su utilidad en el desempeño del pavimento es limitada debido a las muchas incertidumbres involucradas. El análisis del daño incremental que sufre la estructura de un pavimento considerado en los métodos mecanicistas-empíricos se basa en los esfuerzos y deformaciones que se producen durante el periodo de diseño bajo la influencia del tráfico y cargas medioambientales. Sea cual fuere el método de diseño utilizado, el resultado deberá ser una estructura de pavimento adecuada (tanto desde el punto de vista funcional como económico) para resistir de manera satisfactoria las solicitudes a las que se encontrará sometido durante su vida útil, por lo que resulta indispensable conocer la magnitud de los esfuerzos y deformaciones.

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo General**

Determinar y analizar el comportamiento estructural que tienen los pavimentos rígidos utilizados en la construcción de vías urbanas del cantón Cuenca, con la finalidad de proveer información sobre los parámetros críticos a ser considerados en los diseños y construcción de pavimentos rígidos bajo las condiciones locales.

### **1.5.2 Objetivos Específicos**

- Determinar geometrías típicas de las vías urbanas del cantón Cuenca y materiales utilizados en la construcción de las mismas.
- Establecer las cargas de tráfico de diseño de las vías urbanas del cantón Cuenca.
- Modelar los pavimentos rígidos existentes por medio de elementos finitos para varios escenarios con los parámetros considerados en el diseño y construcción de las vías.



- Analizar los esfuerzos y deformaciones a los que se hallan sujetos los pavimentos rígidos, evaluando posibles casos de deterioro.
- Proponer pautas para el diseño de pavimentos rígidos en el cantón Cuenca considerando las cargas de los vehículos y aspectos climáticos.

## 1.6 Alcance

Basados en la información recopilada de estudios y diseños realizados por el GAD del cantón Cuenca, para más de un centenar de vías urbanas que se construyen con pavimento rígido en esta ciudad, y las consideraciones establecidas en la bibliografía para valorar el efecto de las cargas y el medioambiente en las losas de pavimentos, se pretende determinar y analizar los esfuerzos y deformaciones que se producen sobre las losas de pavimentos y los posibles daños asociados a los mismos.

Como datos de entrada para la modelación por elementos finitos, se emplearán los valores considerados en el diseño y construcción de los pavimentos, previa a su verificación. Se realizarán mediciones y observaciones de los procesos constructivos para obtener información relacionada con la geometría y tamaños de losas, elementos de transmisión de cargas en juntas longitudinales y transversales, confinamiento lateral de secciones de pavimento, y los materiales utilizados.

De la información recopilada de los estudios y diseños, se caracterizará el tráfico, como tipos de vehículos y porcentajes respecto al tráfico promedio diario anual, distribución del tráfico, composición, cargas y configuraciones de eje, frecuencias de paso y ubicación de las cargas. Para considerar los efectos del clima, se establecerán posibles gradientes térmicos que soportan las losas de pavimento.

Para la modelación y comparación de resultados se empleará el programa de elementos finitos KENPAVE (Huang, 2004b). Los valores obtenidos en la modelación, como respuestas



del pavimento, serán sometidos a un análisis de sensibilidad con respecto a los parámetros considerados en la modelación. El posible desempeño de los pavimentos será determinado a través de funciones de transferencia o modelos de deterioro existentes.

### **1.7 Limitaciones**

En este estudio se consideran únicamente las vías contempladas dentro de los programas de pavimentación rígida que han llevado a cabo varias administraciones municipales en la ciudad de Cuenca - Ecuador. Esta investigación está basada principalmente en la información contenida en los estudios realizados por los diferentes departamentos del Gobierno Autónomo Descentralizado del Cantón Cuenca para el diseño y construcción de vías urbanas.

Los materiales que forman parte de la estructura del pavimento y que han sido utilizados durante la construcción, se supone que cumplen con las especificaciones dadas en los diseños, por lo que no serán sometidas a ensayos de laboratorio para verificar sus valores característicos utilizados durante la modelación.

La información adicional requerida para la modelación de diferentes escenarios que permitan determinar las respuestas de los pavimentos rígidos estudiados, se obtuvo de la recopilación visual de datos de campo e información disponible en la bibliografía para valores de los parámetros en los que se tiene poca o ninguna información.



## 2 Marco Teórico

En este capítulo se presentan los conceptos y ecuaciones considerados para estimar los esfuerzos, las deformaciones y el deterioro a los que están expuestos los pavimentos rígidos a ser analizados en el presente trabajo.

### 2.1 Evolución de los métodos de diseño de pavimentos

A pesar de que el diseño de pavimentos ha tenido grandes avances más cercanos a la ciencia, el empirismo sigue siendo importante incluso hoy en día. Antes de 1920, los espesores de los pavimentos estaban basados únicamente en la experiencia. En las carreteras se utilizaban los mismos espesores, a pesar de tener suelos con condiciones muy diferentes. Con la experiencia ganada a través de los años, nuevos métodos fueron desarrollados para determinar el espesor requerido de los pavimentos (Huang, 2004b). A continuación se presentan algunos de los métodos utilizados para el diseño de pavimentos detallados en el libro *Pavement Analysis and Design*, de Huang (2004b).

- ***Métodos totalmente empíricos.*** Los métodos empíricos están basados en una clasificación de la subrasante, asignando un índice de grupo, a partir de la cual se determinaba los espesores de capas del pavimento. En los métodos empíricos con pruebas de resistencia, los espesores de pavimentos estaban relacionados con el CBR (California Bearing Ratio) de la subrasante. La desventaja de un método empírico es que éstos pueden ser solamente aplicados para un conjunto dado de condiciones medioambientales, materiales y cargas.



- ***Métodos de regresión basados en desempeño de pavimentos y pruebas de carretera.***

Un buen ejemplo del uso de ecuaciones de regresión para el diseño de pavimentos, tanto flexibles como rígidos, es el método de la AASHTO (AASHTO, 1993) basado en los resultados de pruebas de carretera. La desventaja de estos métodos es que las ecuaciones de diseño pueden ser aplicadas en las mismas condiciones del sitio de las carreteras de prueba. También se han desarrollado ecuaciones de regresión a partir del desempeño observado en pavimentos existentes. Estos últimos, a diferencia del anterior, los materiales y la construcción de pavimentos no fueron controlados, dando una gran dispersión de datos.

- ***Métodos mecanicistas-empíricos.*** Los métodos de diseño mecanicistas-empíricos están basados en las respuestas mecánicas de los materiales, que relacionan parámetros de entrada, como la carga, con un parámetro de salida o respuesta del pavimento, como un esfuerzo o deformación. Los valores de respuesta son utilizados para predecir el deterioro a través de ensayos de laboratorio y datos de desempeño en campo.

Según Huang (2004b), el desarrollo de los métodos de diseño para pavimentos rígidos (construidos con concreto de cemento Portland) no es tan complejo como aquellos de pavimentos flexibles, porque el esfuerzo a flexión en el concreto ha sido durante mucho tiempo considerado el principal, o incluso el único, factor de diseño. Soluciones analíticas que van desde simples fórmulas de forma cerrada hasta derivadas complejas, están disponibles para determinar los esfuerzos y deflexiones en pavimentos de concreto. La teoría más extensivamente estudiada sobre los esfuerzos y deflexiones en pavimentos de concreto fue realizada por Westergaard (desde 1926 a 1948), quien desarrolló una serie de ecuaciones (detalladas en el literal 2.3), tanto para el alabeo por temperatura como también para tres



casos de cargas: carga aplicada cerca de la esquina de losas, en el borde pero distantes desde cualquier esquina, y en el interior de losas distantes desde cualquier borde. El análisis estaba basado sobre supuestos como que las presiones reactivas entre la losa y la subrasante en un punto dado son proporcionales a la deflexión en ese punto, independiente de la deflexión en cualquier otro punto. Este tipo de cimentación que considera a la subrasante como un conjunto de resortes independientes es llamada líquida o cimentación de Winkler (Figura 2.1).

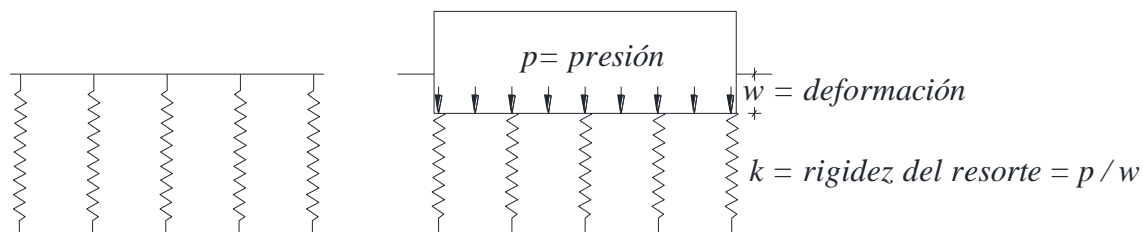


Figura 2.1. Cimentación de Winkler

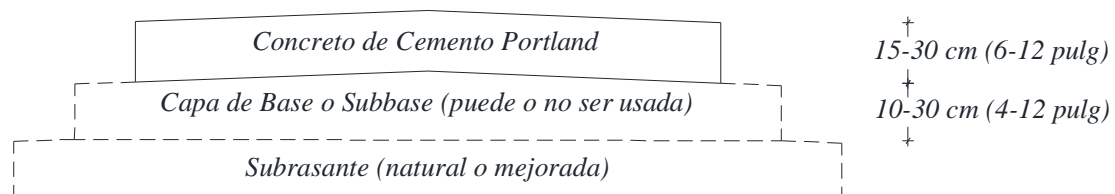
Teniendo en cuenta que las subrasantes se comportan más como un sólido elástico que como un líquido denso, otras soluciones teóricas como la de Pickett para losas de concreto sobre un medio elástico también han sido desarrolladas (Huang, 2004b). Todas las soluciones analíticas asumen que la losa y la subrasante están en total contacto. Pero el bombeo y el alabeo de las losas por temperatura o humedad, hacen que se pierda usualmente el contacto. Con la ventaja que brindan las computadoras y los métodos numéricos, algunos análisis basados en contacto parcial, sobre cimentaciones sólidas o de capas, han sido desarrollados.

## 2.2 Pavimentos Rígidos

Los pavimentos rígidos son construidos con concreto de cemento portland y deben ser analizados por la teoría de placas, en lugar de la teoría de capas (Huang, 2004b). La teoría de placa es una versión simplificada de la teoría de capas que considera a la losa de concreto



como una placa de espesor medio antes de doblarse y que permanece plano después de doblarse. La teoría de capas de Burmister, que se utiliza para analizar los pavimentos flexibles, tiene una limitación importante y es la suposición de que las capas tienen una extensión de área infinita. Esta suposición hace que la teoría sea inaplicable a los pavimentos rígidos que poseen juntas. Tampoco se puede aplicar la teoría de capas a pavimentos rígidos cuando las cargas de las ruedas están a menos de 0.60 o 0.90 m del borde del pavimento, porque la discontinuidad causa un gran esfuerzo en el borde. Su aplicación a pavimentos flexibles está validada por el área limitada de distribución de esfuerzos a través de materiales flexibles, lo que no sucede con el concreto que es mucho más rígido y distribuye la carga sobre una área más amplia. A diferencia de los pavimentos flexibles, los pavimentos rígidos son colocados ya sea directamente sobre una subrasante mejorada o sobre una sola capa de material granular o estabilizada llamada capa de base o subbase. En la Figura 2.2 se muestra una sección típica de los pavimentos rígidos.



*Figura 2.2. Sección transversal típica de un pavimento rígido.*

A pesar de que las capas de base o subbase pueden reducir los esfuerzos críticos en el concreto, no resulta económico colocar una capa de base o subbase solo con el propósito de reducir estos esfuerzos. Debido a que la resistencia del concreto es mucho mayor que el de la capa de base, los mismos esfuerzos críticos en las losas de concreto pueden ser obtenidos sin una capa de base pero aumentando ligeramente el espesor del concreto. Algunas razones como el control del bombeo, control de la acción de las heladas, mejoras en el drenaje,





control de la contracción y el hinchamiento de la subrasante y facilidades para la construcción, han sido frecuentemente citadas para justificar el uso de capas de base o subbase (Huang, 2004b).

En general, los pavimentos rígidos pueden clasificarse en: pavimentos de concreto simple con juntas (JPCP), pavimentos de concreto reforzado con juntas (JRCP), pavimentos de concreto con refuerzo continuo (CRCP) y pavimentos de concreto pretensado (PCP) como se indica en la Figura 2.3.

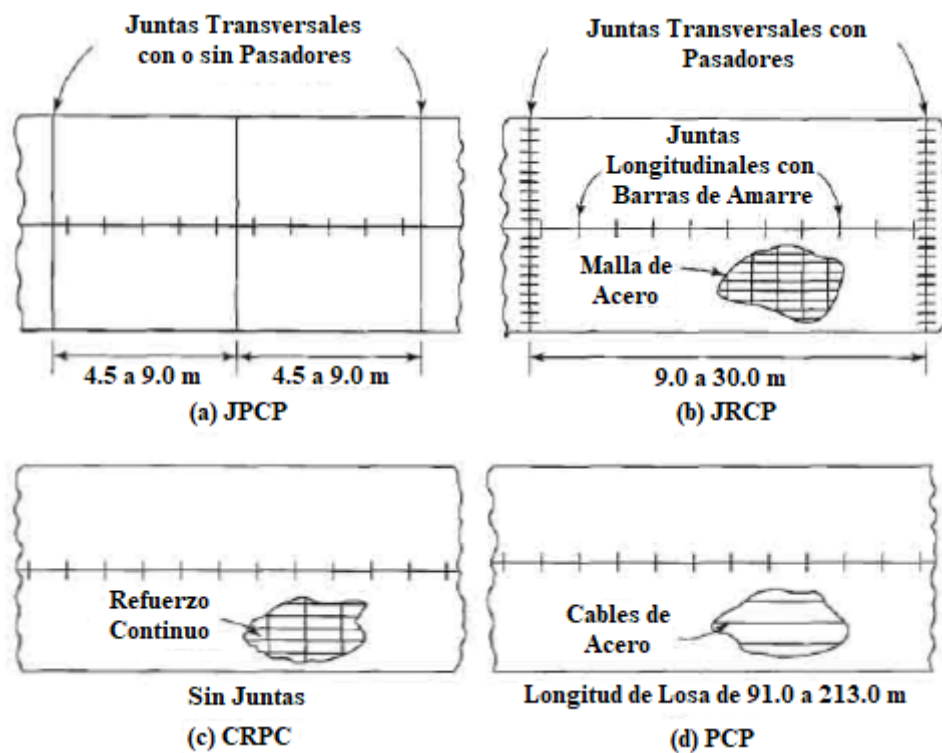


Figura 2.3. Tipos de pavimentos rígidos (Huang, 2004b)

Los pavimentos de concreto simple con juntas, denominados JPCP, por sus siglas en inglés, (Jointed Plain Concrete Pavements) y que abarcan a todas las vías objeto de este estudio, son construidos con juntas de contracción generalmente espaciadas a distancias menores a 24 veces el espesor de la losa (en centímetros). La transferencia de carga entre losas se puede lograr por trabazón de agregados o mediante el uso de barras de acero lisas



conocidas como pasadores o dovelas y cuyo diámetro suele ser aproximadamente  $1/8$  del espesor de la losa (en centímetros). A medida que la separación entre las juntas aumenta, la trabazón de agregados disminuye, incrementando también el riesgo de agrietamiento.

## **2.3 Esfuerzos y deflexiones en pavimentos rígidos**

En esta sección se indican los esfuerzos y deflexiones que se producen en pavimentos rígidos basados en la teoría de Westergaard, que considera al pavimento como una placa sobre una cimentación líquida en contacto total con la subrasante. Estas definiciones han sido adoptadas de Huang (2004b), y es aplicable a los casos de estudio.

### **2.3.1 Esfuerzos debidos a cambios de temperatura y/o humedad**

Durante el día, cuando la temperatura en la superficie de las losas es mayor que en el fondo, la superficie tiende a expandirse con respecto al eje neutro, mientras que el fondo tiende a contraerse. Sin embargo, el peso de la losa restringe esta expansión y contracción, induciendo esfuerzos de compresión en la superficie de la losa y esfuerzos de tensión en el fondo. En la noche, cuando la temperatura en la superficie de la losa es menor que en el fondo, la superficie tiende a contraerse con respecto al fondo; esto produce esfuerzos de tensión en la superficie y esfuerzos de compresión en el fondo de las losas.

Cuando la temperatura en la superficie es mayor que en el fondo, la superficie es más larga que el fondo y la losa se curva hacia abajo. Para ejemplificar el efecto, los resortes exteriores (Figura 2.4) en los bordes de la losa están en compresión y empujan a la losa hacia arriba, mientras los resortes en el interior de la losa están en tensión y halan la losa hacia abajo. Como resultado, la superficie de la losa está en compresión y el fondo está en tensión. Lo contrario sucede cuando la temperatura es menor en la superficie que en el fondo de la losa.

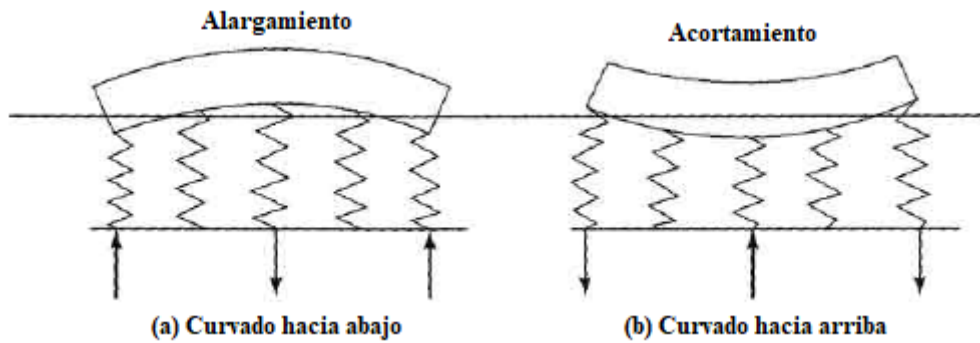


Figura 2.4. Alabeo de losas debido al gradiente térmico (Huang, 2004b)

Westergaard (1926) desarrolló ecuaciones para determinar los esfuerzos por alabeo en los pavimentos de concreto basado en la teoría de placas. Estos esfuerzos también pueden ser determinados a través de la ley de Hooke asumiendo deformaciones planas como se indica en la Figura 2.5.

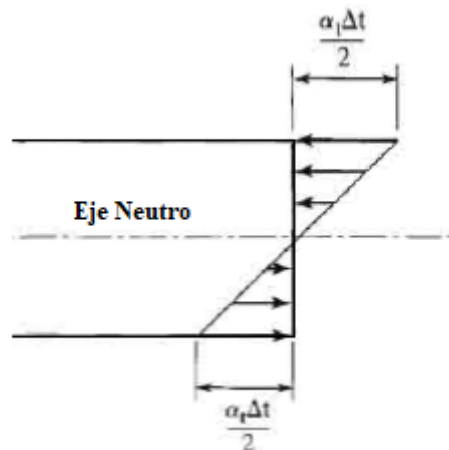


Figura 2.5. Deformaciones por gradiente de temperatura en una losa de concreto (Huang, 2004b)

A diferencia de una viga donde los esfuerzos son en una dirección, en una placa los esfuerzos son en ambas direcciones y deben ser superpuestos para obtener el esfuerzo total. Así el esfuerzo total en una dirección debido al alabeo de una losa en las dos direcciones en una placa de dimensión infinita y asumiendo una distribución lineal de la temperatura a través del espesor de la placa puede ser obtenido por la ecuación Ec. (2.1):



$$\sigma_x = \frac{E\alpha_t\Delta_t}{2(1-\nu^2)}(1+\nu) = \frac{E\alpha_t\Delta_t}{2(1-\nu)} \quad \text{Ec. (2.1)}$$

Donde:

$E$  = Módulo elástico del concreto

$\alpha_t$  = Coeficiente de expansión térmica del concreto

$\Delta_t$  = Diferencial de temperatura entre la superficie y el fondo de la losa

$\nu$  = Módulo de Poisson del concreto (generalmente 0.15)

Para una losa de dimensiones finitas con una longitud  $L_x$  en la dirección  $x$  y  $L_y$  en la dirección  $y$  como se indica en la Figura 2.6, el esfuerzo total en la dirección  $x$  puede ser expresado como Ec. (2.2a).

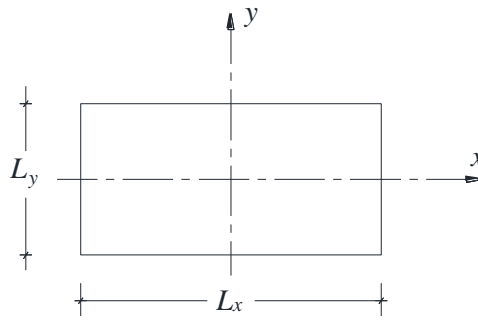


Figura 2.6. Losa de dimensiones finitas (Huang, 2004b)

$$\sigma_x = \frac{C_x E \alpha_t \Delta_t}{2(1-\nu^2)} + \frac{C_y \nu E \alpha_t \Delta_t}{2(1-\nu^2)} = \frac{E \alpha_t \Delta_t}{2(1-\nu^2)} (C_x + \nu C_y) \quad \text{Ec. (2.2a)}$$

Donde  $C_x$  y  $C_y$  son factores de corrección para losas finitas, los mismos que se determinan en base a la Figura 2.7. En esta ecuación el primer término es el esfuerzo en  $x$  debido al alabeo en la dirección  $x$  y el segundo término es el esfuerzo debido al alabeo en la dirección  $y$ . De manera similar el esfuerzo total en la dirección  $y$  es:



$$\sigma_y = \frac{E\alpha_t\Delta_t}{2(1-\nu^2)}(C_y + \nu C_x) \quad \text{Ec. (2.2b)}$$

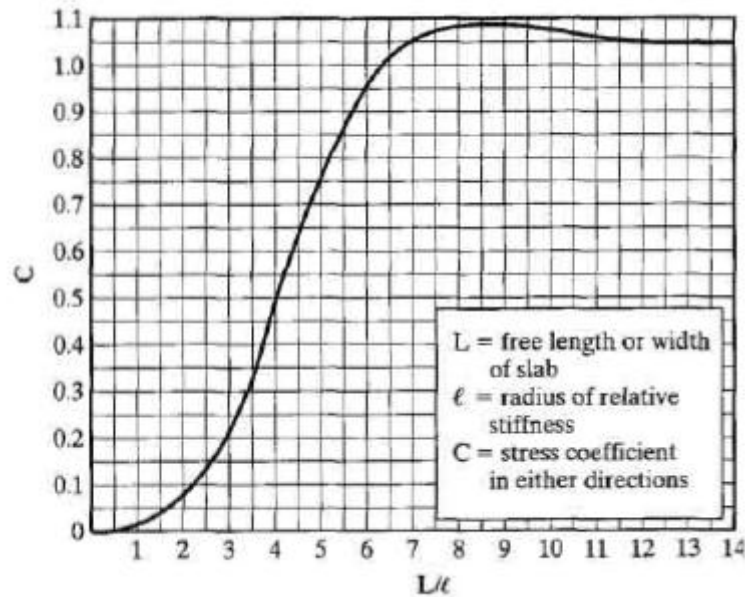


Figura 2.7. Factor de corrección de esfuerzos por gradiente térmico en losas finitas (Huang, 2004b)

El factor de corrección  $C_x$  depende de  $L_x/\ell$  y el factor de corrección  $C_y$  depende de  $L_y/\ell$ , donde  $\ell$  es el radio de rigidez relativa definido como:

$$\ell = \left[ \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)k} \right]^{0.25} \quad \text{Ec. (2.3)}$$

Donde:

$E$  = Módulo elástico del concreto

$h$  = Espesor de la losa

$\nu$  = Módulo de Poisson del concreto

$k$  = Módulo de reacción de la subrasante

Las ecuaciones Ec. (2.2a) y Ec. (2.2b) dan el máximo esfuerzo interior en el centro de la losa. El esfuerzo de borde en el medio de la losa puede ser determinado por:



$$\sigma = \frac{CE\alpha_t\Delta_t}{2} \quad \text{Ec. (2.4)}$$

Donde  $\sigma$  puede ser  $\sigma_x$  ó  $\sigma_y$  dependiendo si  $C$  es  $C_x$  ó  $C_y$ .

### 2.3.2 Esfuerzos y deformaciones debido a cargas

Tres métodos pueden ser usados para determinar los esfuerzos y deflexiones en los pavimentos de concreto: fórmulas de forma cerrada, cartas de influencia y programas computacionales de elementos finitos. Las formulas originalmente desarrolladas por Westergaard pueden ser aplicadas únicamente a una carga de rueda simple con un área de contacto circular (Figura 2.8), semicircular, elíptica o semielíptica. Las cartas de influencia de Pickett y Ray pueden ser aplicadas a múltiples cargas de ruedas de cualquier configuración. Ambos métodos son aplicables solo a losas largas sobre una cimentación líquida. Si las cargas son aplicadas a múltiples losas sobre una cimentación líquida, sólida o de capas con transferencia de cargas entre juntas, únicamente los métodos de elementos finitos pueden ser usados (Huang, 2004b).

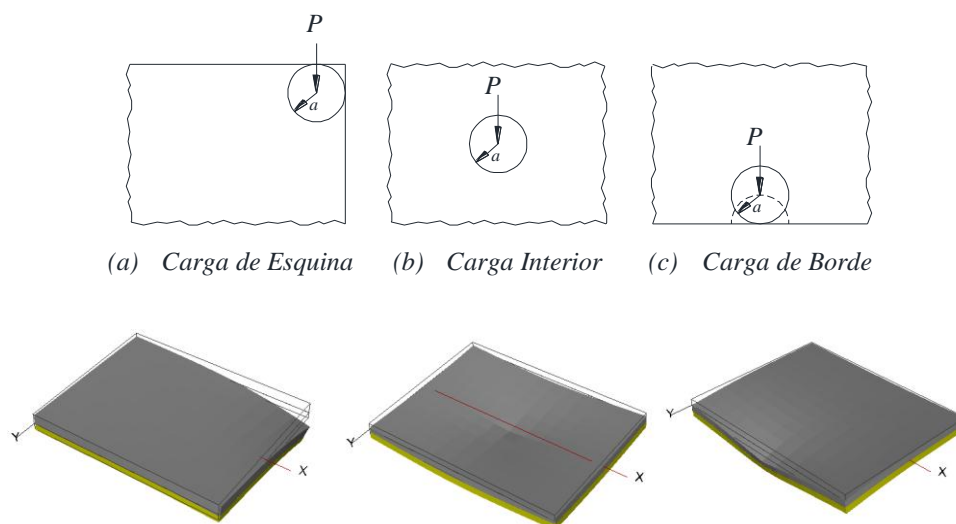


Figura 2.8. Posiciones de carga analizadas por Westergaard



En el caso de los pavimentos rígidos se debe evaluar, tanto los esfuerzos, como las deformaciones en la esquina, centro y bordes de la losa.

### 2.3.2.1 Cargas de esquina

Para una carga circular aplicada cerca de la esquina de una losa como se indica en la Figura 2.8a, donde el esfuerzo máximo no está cerca de la esquina y la fuerza total de reacción de la subrasante es considerable y no puede ser despreciada, Westergaard aplicó un método de aproximaciones sucesivas y obtuvo las siguientes fórmulas para el esfuerzo y deflexión:

$$\sigma_e = \frac{3P}{h^2} \left[ 1 - \left( \frac{a\sqrt{2}}{\ell} \right)^{0.6} \right] \quad \text{Ec. (2.5)}$$

$$\Delta_e = \frac{P}{k\ell^2} \left[ 1.1 - 0.88 \left( \frac{a\sqrt{2}}{\ell} \right) \right] \quad \text{Ec. (2.6)}$$

Donde:

$\sigma_e$  = Esfuerzo debido a la carga de esquina

P = Carga concentrada

h = Espesor de la losa

a = Radio del área de contacto

$\ell$  = Radio de rigidez relativa

$\Delta_e$  = Deflexión en la esquina

k = Módulo de reacción de la subrasante

Ioannides (Ioannides, Thompson, & Barenberg, 1985) aplicando métodos de elementos finitos para evaluar las soluciones de Westergaard sugiere el uso de las siguientes fórmulas para cargas de esquina:



$$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[ 1 - \left( \frac{c}{\ell} \right)^{0.72} \right] \quad \text{Ec. (2.7)}$$

$$\Delta_c = \frac{P}{k\ell^2} \left[ 1.205 - 0.69 \left( \frac{c}{\ell} \right) \right] \quad \text{Ec. (2.8)}$$

En las cuales  $c$  es la longitud del lado de una área de contacto cuadrada. Si la carga es aplicada sobre una área circular, el valor de  $c$  debe ser seleccionado de tal forma que el cuadrado y el círculo tengan la misma área de contacto, por lo tanto  $c = 1.772 a$

### 2.3.2.2 Cargas en el interior

Las fórmulas desarrolladas por Westergaard (1926) para calcular el esfuerzo en una losa con una área cargada de forma circular actuando en el interior de la losa como se muestra en la Figura 2.8b son.

$$\sigma_i = \frac{3(1+\nu)P}{2\pi h^2} \left( \ln \frac{\ell}{b} + 0.6159 \right) \quad \text{Ec. (2.9a)}$$

con

$$b = a \quad \text{cuando } a \geq 1.724h$$

$$b = \sqrt{1.6a^2 + h^2} - 0.675h \quad \text{cuando } a < 1.724h \quad \text{Ec. (2.9b)}$$

La ecuación para la deflexión debido a una carga interior es:

$$\Delta_i = \frac{P}{8k\ell^2} \left\{ 1 + \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{a}{2\ell} \right) - 0.673 \right] \left( \frac{a}{\ell} \right)^2 \right\} \quad \text{Ec. (2.10)}$$

Donde:

$\sigma_i$  = Esfuerzo debido a la carga interior

$P$  = Carga concentrada

$h$  = Espesor de la losa

$a$  = Radio del área de contacto

$\ell$  = Radio de rigidez relativa





$\Delta_i$  = Deflexión debido a la carga interior

$k$  = Módulo de reacción de la subrasante

### 2.3.2.3 Cargas de borde

El esfuerzo debido a la carga de borde (Figura 2.8c) de acuerdo a Ioannides (Ioannides et al., 1985), puede ser obtenido con las siguientes ecuaciones.

$$\sigma_e (\text{círculo}) = \frac{3(1+\nu)P}{\pi(3+\nu)h^2} \left[ \ln \left( \frac{Eh^3}{100ka^4} \right) + 1.84 - \frac{4\nu}{3} + \frac{1-\nu}{2} + \frac{1.18(1+2\nu)a}{\ell} \right] \quad \text{Ec. (2.11)}$$

$$\sigma_e (\text{semicírculo}) = \frac{3(1+\nu)P}{\pi(3+\nu)h^2} \left[ \ln \left( \frac{Eh^3}{100ka^4} \right) + 3.84 - \frac{4\nu}{3} + \frac{(1+2\nu)a}{2\ell} \right] \quad \text{Ec. (2.12)}$$

$$\Delta_e (\text{círculo}) = \frac{\sqrt{2+1.2\nu} P}{\sqrt{Eh^3k}} \left[ 1 - \frac{(0.76+0.4\nu)a}{\ell} \right] \quad \text{Ec. (2.13)}$$

$$\Delta_e (\text{semicírculo}) = \frac{\sqrt{2+1.2\nu} P}{\sqrt{Eh^3k}} \left[ 1 - \frac{(0.323+0.17\nu)a}{\ell} \right] \quad \text{Ec. (2.14)}$$

Donde:

$\sigma_e$  = Esfuerzo debido a una carga de borde

$P$  = Carga concentrada

$h$  = Espesor de la losa

$a$  = Radio del área de contacto

$\ell$  = Radio de rigidez relativa

$\Delta_e$  = Deflexión en el borde

$k$  = Módulo de reacción de la subrasante



Para el caso de las cargas con un área de contacto de forma semicircular, el diámetro del semicírculo, está alineado con el borde de la losa.

## 2.4 Juntas de pavimentos rígidos y transferencia de cargas

Las juntas deben ser colocadas en los pavimentos rígidos para prevenir grietas prematuras debido a los cambios de temperatura o humedad. Existen cuatro tipos de juntas comúnmente usadas en los pavimentos rígidos: de contracción, de dilatación, de construcción y longitudinales. La forma en la que son construidas las juntas influye directamente en la transferencia de carga a través de las mismas (Huang, 2004b).

### 2.4.1 Eficiencia de transferencia de carga en juntas.

La eficiencia en la transferencia de cargas (LTE, Load Transfer Efficiency) de una junta se define como la relación de deflexiones entre las losas no cargadas y cargadas en el lado opuesto de la junta como se indica en la siguiente expresión:

$$LTE = \frac{\delta_{lnc}}{\delta_{lc}} \quad \text{Ec. (2.15)}$$

Donde:

LTE = Eficiencia en la transferencia de carga

$\delta_{lnc}$  = Deflexión de la losa no cargada

$\delta_{lc}$  = Deflexión de la losa cargada

Con mayores eficiencias en la transferencia de carga, se logran menores esfuerzos y deflexiones en puntos críticos de las losas como juntas o grietas, debido a que la carga es absorbida por dos losas en lugar de una sola. La transferencia de carga juega un papel muy importante en el diseño de pavimentos. Una deficiente transferencia de carga está asociada directamente con las principales causas del deterioro de los pavimentos rígidos.



La transferencia de cargas se puede lograr mediante la implementación de pasadores (barras de acero) y/o a través de la trabazón de los agregados que constituyen el concreto por el desarrollo de esfuerzos de corte en las dos caras de una junta o grieta. En el programa KENPAVE (Huang, 2004a), la rigidez de la junta es representada por una constante de resorte de corte  $C_w$  definida como:

$$C_w = \frac{\text{Fuerza de corte por unidad de longitud de junta}}{\text{Diferencia en la deflexión entre dos losas}} \quad \text{Ec. (2.16)}$$

La Figura 2.9 muestra la transferencia de carga a través de una junta mediante trabazón de agregados, como lo indica un resorte que tiene una constante de muelle  $C_w$ . Después de que se aplica la carga, la losa izquierda desciende una cantidad  $w_l$ , y el resorte empuja la losa derecha hacia abajo una distancia  $w_r$ . La diferencia en la deflexión es  $w_d$  igual a  $w_l - w_r$ .

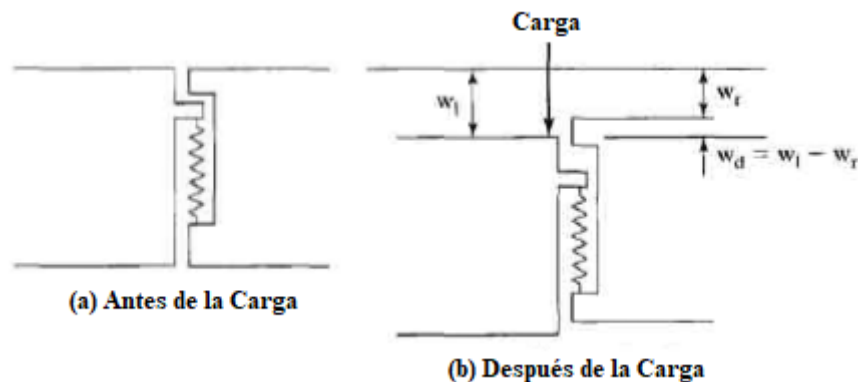


Figura 2.9. Transferencia de corte a través de una junta mediante trabazón de agregados (Huang, 2004b)

Modelos no lineales de transferencia de carga por trabazón de agregados, como por ejemplo el modelo de Walraven incorporado en el programa EverFE (Davis, 2003), permiten considerar tanto el efecto del desplazamiento vertical relativo de la junta como la abertura de



la junta sobre la efectividad de la transferencia de carga. Parámetros del modelo son el diámetro máximo del agregado, el volumen de la fracción de agregados, la resistencia de la pasta de cemento, y el coeficiente de fricción entre la pasta y el agregado.

En la bibliografía utilizada para el desarrollo de este trabajo, se sugieren valores referenciales para ciertos parámetros considerados en las ecuaciones anteriores y se indican a continuación.

*Tabla 2.1. Valores referenciales de parámetros del concreto sugeridos para el cálculo de esfuerzos y deformaciones en pavimentos rígidos*

Variable	Descripción	Valor referencial sugerido o aproximado
$\nu$	Módulo de Poisson del concreto	entre 0.15 y 0.20
$E_c$	Módulo elástico del concreto	27.6 GPa ( $4 \times 10^6$ psi)
$\gamma_c$	Peso unitario del concreto	23.6 kN/m <sup>3</sup> (0.0868 pci)
$\alpha_t$	Coefficiente de expansión térmica del concreto	$5 \text{ a } 6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{F}$ ; o de $9 \text{ a } 10.8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

## 2.5 Métodos de diseño de pavimentos rígidos

La Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12-MTOP (MTOP, 2013), dentro de los métodos de diseño a utilizar, considera: el método de la AASHTO, el método de la Portland Cement Association (PCA) y métodos de diseño analítico, mecanicistas o racionales; y sugiere como métodos de diseño recomendados para pavimentos rígidos, utilizar el método de la AASHTO o el método de la PCA. Debido a que en nuestro medio se usan de forma más extensa el método de la AASHTO 93 y el método de la PCA, en esta sección se describen las formulas y los parámetros contemplados en estos métodos para el diseño del espesor de losa. También



se realiza una breve descripción de las principales consideraciones incluidas en el nuevo método empírico mecanicista de la AASHTO (ME-PDG).

### 2.5.1 Método AASHTO 93

El método de diseño para estructuras de pavimento que propone la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) en la edición de 1993, se describe en la guía de diseño para pavimentos rígidos desarrollada al mismo tiempo que la de pavimentos flexibles (AASHTO, 1993). El diseño se basa en ecuaciones empíricas obtenidas de la prueba de carretera AASHO (llevada a cabo durante el periodo de 1958 a 1960 en Ottawa, Illinois), con modificaciones adicionales basadas en la teoría y la experiencia, para hacerlas aplicables a otras regiones.

Debe tenerse en cuenta que las ecuaciones originales se desarrollaron bajo un entorno climático determinado, con un conjunto específico de materiales de pavimento y suelos de subrasante. El clima en el sitio de prueba es templado, con una precipitación anual promedio de aproximadamente 34 pulgadas (864 mm). Los suelos de la subrasante eran tipo A-6 y A-7-6 con un drenaje deficiente y valores de CBR que varían de 2 a 4.

En la carretera de prueba AASHO se tenían las siguientes condiciones: Módulo de elasticidad del concreto  $E_c = 4.2 \times 10^6$  psi (29 GPa), Módulo de rotura del concreto  $S_c = 690$  psi (4.8 MPa), Módulo de reacción de la subrasante  $k = 60$  pci (16 MN/m<sup>3</sup>), Coeficiente de transferencia de carga  $J = 3.2$  y un Coeficiente de drenaje  $C_d = 1.0$ .

Las ecuaciones básicas desarrolladas a partir de la Prueba de Carretera AASHO para pavimentos rígidos tienen la misma forma que las de pavimentos flexibles, pero con valores diferentes para las constantes de regresión.



Las ecuaciones se modificaron para incluir muchas variables originalmente no consideradas en la Prueba de Carretera AASHO. La ecuación de diseño final para pavimentos rígidos se convierte en (AASHTO, 1993):

$$\log W_{18} = Z_R S_o + 7.35 \log(D + 1) - 0.06 + \frac{\log[\Delta PSI / (4.5 - 1.5)]}{1 + 1.624 \times 10^7 / (D + 1)^{8.46}} + (4.22 - 0.32p_t) \log \left\{ \frac{S_c C_d (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 J [D^{0.75} - 18.42 / (E_c / k)^{0.25}]} \right\} \quad \text{Ec. (2.17)}$$

Donde:

$W_{18}$  = Número de aplicaciones de carga de un eje simple de 18 kips

$Z_R$  = Valor estándar de confiabilidad en la curva de distribución normal

$S_o$  = Desviación estándar de todas las variables

$D$  = Espesor del pavimento de concreto, en pulgadas

$\Delta PSI$  = Pérdida de serviciabilidad de diseño

$p_t$  = Serviciabilidad al final del período de diseño

$S_c$  = Módulo de rotura del concreto, en psi

$C_d$  = Coeficiente de drenaje

$J$  = Coeficiente de transmisión de carga en juntas

$E_c$  = Módulo de elasticidad del concreto, en psi

$k$  = Módulo de reacción de la subrasante, en pci

La Ec. (2.17) es una ecuación de desempeño que da la cantidad permisible de aplicaciones de carga de un eje de 18 kip (80 kN)  $W_{18}$  para causar la reducción de PSI a  $p_t$ . Si el número previsto de aplicaciones es igual al número permisible  $W_{18}$ , la confiabilidad del diseño es solo del 50%, ya que todas las variables se basan en valores medios.

La AASHTO recomienda el nivel de confiabilidad de acuerdo a una clasificación funcional de la vía que se esté diseñando, según lo que se indica en la Tabla 2.2.



Tabla 2.2. Niveles de confiabilidad sugeridos según la clasificación funcional de la vía (AASHTO, 1993)

Calsificación funcional	Nivel de confiabilidad recomendado	
	Urbano	Rural
Interestatal	85-99.9	80-99.9
Arterias principales	80-99	75-95
Colectoras	80-95	75-95
Locales	50-80	50-80

El valor de la desviación normal estándar  $Z_R$  para un nivel de confiabilidad asumido se puede obtener de la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Desviación normal estándar para varios niveles de confiabilidad (AASHTO, 1993)

Confiabilidad	Desviación normal	Confiabilidad	Desviación normal
(%)	estándar ( $Z_R$ )	(%)	estándar ( $Z_R$ )
50	0.000	93	-1.476
60	-0.253	94	-1.555
70	-0.524	95	-1.645
75	-0.674	96	-1.751
80	-0.841	97	-1.881
85	-1.037	98	-2.054
90	-1.282	99	-2.327
91	-1.340	99.9	-3.090
92	-1.405	99.99	-3.750

La AASHTO también sugiere los siguientes valores a ser considerados para el coeficiente de transferencia de carga,  $J$ , y el coeficiente de drenaje,  $C_d$ , como se indican en la Tabla 2.4 y Tabla 2.5, respectivamente.



Tabla 2.4. Coeficiente de transferencia de carga,  $J$  (AASHTO, 1993)

Tipo de espaldón	Asfalto		Concreto hidráulico (unido)	
	Sí	No	Sí	No
JPCP y JRCP	3.2	3.4-4.4	2.5-3.1	3.6-4.2
CRCP	2.9-3.2	N/A	2.3-2.9	N/A

Tabla 2.5. Valores recomendados de los coeficientes de drenaje,  $C_d$  (AASHTO, 1993)

Calidad de drenaje		Porcentaje de tiempo que la estructura de pavimento está expuesto a niveles de humedad cercanos a la saturación			
Calificación	Agua removida en	< 1%	1-5%	5-25%	>25%
Excelente	2 horas	1.25-1.20	1.20-1.15	1.15-1.10	1.10
Bueno	1 día	1.20-1.15	1.15-1.10	1.10-1.00	1.00
Regular	1 semana	1.15-1.10	1.10-1.00	1.00-0.90	0.90
Pobre	1 mes	1.10-1.00	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80
Muy pobre	Nunca drena	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80-0.70	0.70

En la guía de la AASHTO 93 también se hacen algunas consideraciones para estimar el Módulo de Reacción de la Subrasante ( $k$ ), ya sea con fórmulas de correlación con el Módulo Resiliente de la Subrasante ( $M_R$ ) para losas apoyadas directamente sobre la subrasante, o a través de cartas que consideran el aporte de una capa de subbase colocada entre la losa y la subrasante en función del Espesor de la Capa de Subbase ( $D_{SB}$ ), el Módulo de Elasticidad de la Subbase ( $E_{SB}$ ) y el Módulo Resiliente de la Subrasante. La AASHTO sugiere cartas para considerar el efecto que tiene sobre el valor de  $k$  la Profundidad de un Estrato Rígido ( $D_{SG}$ ), ubicado a distancia menor de 3.00 m por debajo de la subrasante. En este método el efecto estacional del clima sobre el módulo de reacción de la subrasante a lo





largo del año se estima en función del Daño Relativo ( $u_r$ ), que da como resultado un módulo efectivo equivalente. El grado de erodibilidad de la capa sobre la cual está asentada la losa y la consecuente Pérdida de Soporte ( $LS$ ) también es considerada en este método, al momento de asumir un valor del módulo de reacción de la subrasante a utilizarse en la ecuación  $E_c$ . (2.17) para calcular el número permisible de repeticiones de carga de un eje equivalente de 18 kips.

### 2.5.2 Método de la PCA

El procedimiento de diseño de espesores de la Portland Cement Association (PCA) para carreteras y calles de concreto se publicó en 1984, reemplazando al publicado en 1966 (Huang, 2004b). El procedimiento se puede aplicar a JPCP, JRCP y CRCP. Se empleó un programa informático de elementos finitos llamado JSLAB para calcular los esfuerzos y deflexiones críticas, que luego se utilizaron junto con algunos criterios de diseño para desarrollar las tablas y cartas de diseño. Los criterios de diseño se basan en el diseño general del pavimento, el desempeño y la experiencia de investigación, incluidas las relaciones del desempeño de los pavimentos en la prueba de carretera AASHO con los estudios de fallas en el pavimento. Los problemas de diseño pueden resolverse a mano con tablas y gráficos, con la ayuda de hojas de cálculo o software disponibles.

Los principales criterios considerados por la PCA para el diseño de pavimentos son el análisis de fatiga y el análisis de la erosión que pueden sufrir las estructuras de los pavimentos (Huang, 2004b).

#### 2.5.2.1 Análisis de fatiga

El análisis por fatiga se basa en los esfuerzos de tensión en el borde del pavimento, en la mitad de una losa delimitada por dos juntas transversales, con la posición más crítica de



carga como se muestra en la Figura 2.10. Debido a que la carga está cerca de la parte media de la losa lejos de las juntas, la presencia de las juntas prácticamente no tiene ningún efecto sobre el esfuerzo de borde. Cuando un espaldón de concreto está atado al pavimento principal, la magnitud del esfuerzo crítico se reduce considerablemente.

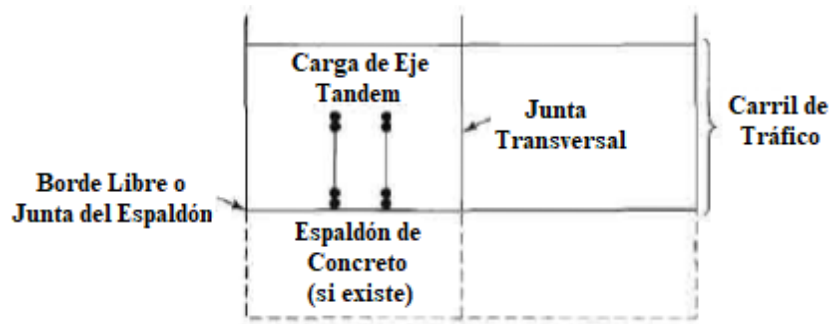


Figura 2.10. Posición crítica de la carga para el análisis por fatiga (Huang, 2004b)

El concepto de daño acumulativo, se usa para el análisis de fatiga. Este concepto ha sido ampliamente utilizado para predecir el agrietamiento por fatiga. En general, se acepta que el número admisible de repeticiones de carga está relacionado con los esfuerzos de tensión que se producen en la capa de concreto. La cantidad de daño se expresa como una relación de daño entre el número previsto y el número permitido de repeticiones de carga. El daño ocurre cuando la suma de las relaciones de daño alcanza el valor de 1.00 o del 100% si se considera como porcentaje. Debido a las variabilidades, el daño no ocurrirá de una vez cuando la proporción alcance exactamente el valor del 100%. Si se usan valores medios de parámetros para el diseño, una relación de daños del 100% indica que la probabilidad de falla es del 50%, es decir, que el 50% del área experimentará agrietamiento por fatiga. La PCA considera la siguiente ecuación para el cálculo del daño acumulado:



$$D_r = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \quad \text{Ec. (2.18)}$$

$D_r$  es la relación de daños acumulada durante el período de diseño debido a todos los grupos de carga,  $m$  es el número total de grupos de carga,  $n_i$  es el número de repeticiones previstas para el  $i$ -ésimo grupo de carga, y  $N_i$  es el número permisible de repeticiones para el  $i$ -ésimo grupo de carga. La relación de daño acumulado,  $D_r$ , al final del período de diseño debe ser menor que 1.

El número permisible de repeticiones puede expresarse en forma general como (Huang, 2004b):

$$\log N_f = f_1 - f_2 \left( \frac{\sigma}{S_c} \right) \quad \text{Ec. (2.19)}$$

Donde:

$N_f$  = Número permisible de repeticiones de carga por fatiga

$\sigma$  = Esfuerzo de flexión en la losa

$S_c$  = Módulo de rotura del concreto

$f_1, f_2$  = Constantes determinadas a partir de las pruebas de fatiga de laboratorio y modificadas para correlacionar con observaciones de desempeño obtenidas en campo.

Las siguientes ecuaciones de fatiga son utilizadas por la PCA (Lee & Carpenter, 2001):

$$\begin{aligned} \log N_f &= 11.737 - 12.077 \left( \frac{\sigma_{eq}}{S_c} \right) & \frac{\sigma_{eq}}{S_c} &\geq 0.55 \\ N_f &= \left( \frac{4.2577}{\frac{\sigma_{eq}}{S_c} - 0.4325} \right)^{3.268} & 0.45 &\leq \sigma_{eq} < 0.55 \\ N_f &= \text{ilimitado} & \frac{\sigma_{eq}}{S_c} &\leq 0.45 \end{aligned} \quad \text{Ec. (2.20)}$$

Donde:

$N_f$  = Número permisible de repeticiones de carga por fatiga



$\sigma_{eq}$  = Esfuerzo equivalente de flexión en el borde de la losa

$S_c$  = Módulo de rotura del concreto

El procedimiento de diseño de la PCA por fatiga, se basa en la determinación de un esfuerzo equivalente ( $\sigma_{eq}$ ) de flexión en el borde de la losa, analizado con el software JSLAB bajo una carga de eje simple (SA) y una carga de eje tándem (TA) para diferentes espesores de losa y módulos de reacción de la subrasante. La PCA solo utiliza un módulo promedio de reacción de subrasante  $k$  (para considerar las variaciones estacionales) para todo el período de diseño, y no se consideran los esfuerzos debidos al alabeo por temperatura y humedad. Los parámetros de entrada básicos que se asumieron son: módulo de elasticidad de la losa  $E_c = 4'000,000$  psi, relación de Poisson  $\nu = 0.15$ , longitud de losa  $L = 180$  pulgadas, ancho de losa  $W = 144$  pulgadas. Se utilizó para el análisis una carga de eje simple estándar de 18 kip (con ruedas duales), cada rueda con una carga igual a 4,500 lbs, una área de contacto de la rueda de forma rectangular de 7 pulgadas de alto por 10 pulgadas de ancho (70 pulgadas<sup>2</sup>, o un radio de carga equivalente,  $a = 4.72$  pulgadas), espaciado de las ruedas  $s = 12$  pulgadas, ancho del eje (distancia entre el centro de las ruedas duales)  $D = 72$  pulgadas; mientras que también se utilizó una carga de eje tándem estándar de 36 kip (con ruedas duales), con un espaciado entre ejes  $t = 50$  pulgadas y el resto de configuraciones de cada eje iguales al eje simple estándar. Si un espaldón de concreto con barras de unión (WS) estaba presente, el factor de trabazón de agregados se asumió como  $AGG = 25,000$  psi. Junto con varios otros factores de ajuste, el esfuerzo equivalente para una carga real dada se define de la siguiente manera (Lee & Carpenter, 2001):

$$\sigma_{eq} = \frac{6 M_e}{h^2} f_1 f_2 f_3 f_4 \quad Ec. (2.21a)$$



$$M_e = \begin{cases} -1600 + 2225 \log(\ell) + 24.42 \ell + 0.204 \ell^2 \dots SA/NS \\ 3029 + 2966.8 \log(\ell) + 133.69 \ell - 0.0632 \ell^2 \dots TA/NS \\ (-970.4 + 1202.6 \log(\ell) + 53.587 \ell)(0.8742 + 0.01088 k^{0.447}) \dots SA/WS \\ (2005.4 - 1980.9 \log(\ell) + 99.008 \ell)(0.8742 + 0.01088 k^{0.447}) \dots TA/WS \end{cases} \quad Ec. (2.21b)$$

$$f_1 = \begin{cases} (24/SAL)^{0.06} (SAL/18) \dots SA \\ (48/TAL)^{0.06} (TAL/36) \dots TA \end{cases} \quad Ec. (2.21c)$$

$$f_2 = \begin{cases} 0.892 + h/85.71 - h^2/300 \dots NS \\ 1 \dots WS \end{cases} \quad Ec. (2.21d)$$

$$f_3 = 0.894 \dots \text{para el 6\% de camiones sobre el borde de la losa} \quad Ec. (2.21e)$$

$$f_4 = \frac{1}{1.235 (1 - CV)} \quad Ec. (2.21f)$$

Donde:

$\sigma_{eq}$  = Esfuerzo equivalente, en psi

$h$  = Espesor de la losa, en pulgadas

$\ell$  = Radio de rigidez relativa del sistema de losa-subrasante en pulgadas, igual al obtenido por la Ecuación 2.3

$k$  = Módulo de reacción de la subrasante, en pci

$f_1$  = Factor de ajuste por el efecto de los ejes de carga y las áreas de contacto

$f_2$  = Factor de ajuste para una losa sin espaldones de concreto

$f_3$  = Factor de ajuste para tener en cuenta el efecto de la posición del camión sobre el esfuerzo de borde (la PCA consideró un valor de  $f_3 = 0.894$  asumiendo que solo un 6% de camiones circulan por el borde de la losa)

$f_4$  = Factor de ajuste para tener en cuenta el aumento de la resistencia del concreto con la edad después del día 28, junto con una reducción en la resistencia del concreto en un coeficiente de variación (CV); (la PCA consideró un valor de  $CV = 15\%$ ,  $f_4 = 0.953$ )

$SAL$  = Carga real del eje simple en kips para la cual se quiere obtener el esfuerzo equivalente

$TAL$  = Carga real del eje en tándem en kips para la cual se quiere obtener el esfuerzo equivalente



El procedimiento de diseño de espesores de la PCA utiliza el número esperado de repeticiones de carga que se dividen entre el número permisible de repeticiones de carga,  $N_f$ , para calcular el porcentaje de daño por fatiga, para cada carga de eje y tipo de eje. El daño acumulado total por fatiga debe estar dentro de un criterio límite de diseño especificado (por ejemplo menor al 100%), o se debe usar un espesor de losa de prueba diferente y repetir cálculos previos otra vez.

### 2.5.2.2 Análisis de erosión

El principal modo de falla en la prueba de carretera AASHO fue el bombeo o la erosión de la subbase granular debajo de las losas. La PCA introdujo el concepto de análisis de erosión para evitar fallas en el pavimento debido al bombeo, la erosión de la cimentación y el escalonamiento de las juntas, las cuales están más relacionados con las deflexiones del pavimento que con los esfuerzos de flexión. La deflexión más crítica del pavimento se produce en la esquina de la losa cuando se coloca un eje de carga en la junta cerca de la esquina, como se muestra en la Figura 2.11.

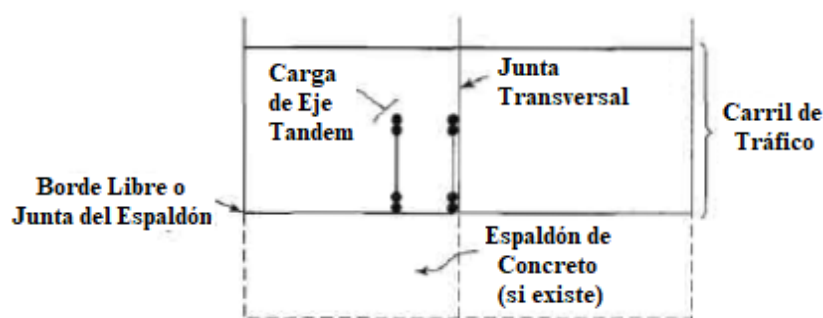


Figura 2.11. Posición crítica de la carga para el análisis de erosión (Huang, 2004b)

Se desarrollaron ecuaciones de deflexión de esquina equivalentes ( $\delta_{eq}$ ) para losas sin espaldones de concreto (NS) o con espaldones de concreto con barras de unión (WS) y con



juntas con trabazón de agregados (ND) o juntas con pasadores (WD) bajo una carga de eje simple (SA) o una carga de eje tándem (TA) que se indican a continuación (Lee & Carpenter, 2001):

$$\delta_{eq} = \frac{p_c}{k} f_5 f_6 f_7 \quad \text{Ec. (2.22a)}$$

$$p_c = \begin{cases} 1.571 + \frac{46.127}{\ell} + \frac{4372.7}{\ell^2} - \frac{22886}{\ell^3} \dots SA/NS/ND \\ 1.847 + \frac{213.68}{\ell} - \frac{1260.8}{\ell^2} + \frac{22989}{\ell^3} \dots TA/NS/ND \\ 0.5874 + \frac{65.108}{\ell} + \frac{1130.9}{\ell^2} - \frac{5245.8}{\ell^3} \dots SA/WS/ND \\ 1.47 + \frac{102.2}{\ell} - \frac{1072}{\ell^2} + \frac{14451}{\ell^3} \dots TA/WS/ND \end{cases} \quad \text{Ec. (2.22b)}$$

$$p_c = \begin{cases} -0.3019 + \frac{128.85}{\ell} + \frac{1105.8}{\ell^2} + \frac{3269.1}{\ell^3} \dots SA/NS/WD \\ 1.258 + \frac{97.491}{\ell} + \frac{1484.1}{\ell^2} - \frac{180}{\ell^3} \dots TA/NS/WD \\ 0.018 + \frac{72.99}{\ell} + \frac{323.1}{\ell^2} + \frac{1620}{\ell^3} \dots SA/WS/WD \\ 0.0345 + \frac{146.25}{\ell} - \frac{2385.6}{\ell^2} + \frac{23848}{\ell^3} \dots TA/WS/WD \end{cases} \quad \text{Ec. (2.22c)}$$

$$f_5 = \begin{cases} SAL/18 \dots SA \\ TAL/36 \dots TA \end{cases} \quad \text{Ec. (2.22d)}$$

$$f_6 = \begin{cases} 0.95 \dots ND/NS \\ 1.001 - \left(0.26363 - \frac{k}{3034.5}\right)^2 \dots ND/WS \\ 1 \dots TA \end{cases} \quad \text{Ec. (2.22e)}$$

$$f_7 = \begin{cases} 0.896 \dots NS \\ 1 \dots WS \end{cases} \quad \text{Ec. (2.22f)}$$

Donde:

$\delta_{eq}$  = Deflexión de esquina equivalente, en pulgadas

$p_c$  = Presión en la interfaz de losa-base, en psi

$f_5$  = Factor de ajuste para el efecto de las cargas por eje

$f_6$  = Factor de ajuste para una losa con juntas sin pasadores y sin espaldones de concreto atados



$f_7$  = Factor de ajuste para tener en cuenta el efecto de la ubicación del camión sobre la deflexión de esquina

SAL, TAL,  $\ell$  y  $k$  tienen las mismas definiciones que las descritas anteriormente para la Ec. (2.21a).

Sin embargo, no se pudieron obtener correlaciones satisfactorias entre las deflexiones de esquina y el desempeño de estos pavimentos. Se encontró que, para poder predecir su desempeño, se tendrían que aplicar diferentes valores de criterios de deflexión, dependiendo del espesor de la losa y, en menor medida, del módulo de reacción de la subrasante. Una mejor correlación se obtuvo relacionando el desempeño con la tasa de trabajo ( $P$ ), definida como el producto de la deflexión de esquina ( $\delta_{eq}$ ) y la presión ( $p_c$ ) en la interfaz de losa-cimentación, dividido por la longitud del cuenco de deflexión, que es una función del radio de rigidez relativa ( $\ell$ ) (Lee & Carpenter, 2001). El concepto es que una losa delgada con un cuenco de deflexión más corto recibe un golpe de carga más rápido que una losa más gruesa. La tasa de trabajo  $P$  se estableció como:

$$P = 268.7 \left( \frac{p_c^2}{h k^{0.73}} \right) = 268.7 \left( \frac{k^{1.27} \delta_{eq}^2}{h} \right) \quad \text{Ec. (2.23)}$$

Donde  $p_c$  es la presión sobre la capa de base debajo de la esquina de la losa, que es igual al producto de la deflexión de la esquina ( $\delta_{eq}$ ) y el módulo de la reacción de la subrasante ( $k$ ) por definición.

El desarrollo del criterio de erosión estuvo relacionado con los estudios de fallas en las juntas de varias carreteras, para incluir una gama más amplia de características de diseño de pavimentos, tales como cargas mixtas y de mayor tráfico de camiones, pavimentos con juntas sin pasadores y subbases estabilizadas, que no se pudieron encontrar en la prueba de





carretera AASHO. La determinación del conocido factor de erosión (EF) en el procedimiento de diseño de espesor de PCA se definió por (Lee & Carpenter, 2001):

$$EF = \log \left( \frac{11111 (0.896 P)^2 C_1}{h k^{0.73}} \right)$$

$$C_1 = 1 - \left( \frac{k}{2000} \frac{4}{h} \right)^2$$

Ec. (2.24)

En el cual,  $C_1$  es un factor de ajuste que tiene un valor cercano a 1.0, para las subbases no tratadas, y disminuye a aproximadamente 0.90, para las subbases estabilizadas. Además, se desarrollaron las siguientes ecuaciones para calcular el número permisible de repeticiones ( $N_e$ ), según los criterios de erosión de la PCA:

$$\log N_e = 14.524 - 6.777 (C_1 P - 9)^{0.103} - \log C_2 \dots C_1 P > 9$$

$$N_e = \text{ilimitado} \dots C_1 P \leq 9$$

$$C_2 = \begin{cases} 0.06 \dots NS \\ 0.94 \dots WS \end{cases}$$

Ec. (2.25)

Donde la constante  $C_2 = 0.06$ , es un factor de ajuste para pavimentos sin espaldones de concreto y  $C_2 = 0.94$  con un espaldón de concreto. El término  $\log C_2$  de la Ec. (2.25) es necesario para tener en cuenta el ajuste realizado a las repeticiones de carga permitidas en la metodología de diseño de PCA.

El procedimiento de diseño de espesores de la PCA utiliza el número esperado de repeticiones de carga que se dividen entre el número permisible de repeticiones de carga por erosión,  $N_e$ , para calcular el porcentaje de daño por erosión, para cada carga de eje y tipo de eje. El daño acumulado total por erosión debe estar también dentro de un criterio límite de diseño especificado (por ejemplo menor al 100%), o se debe usar un espesor de losa de prueba diferente y repetir los cálculos.



### 2.5.3 Método ME-PDG.

La Guía de Diseño de Pavimentos Mecanicista-Empírico (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide - ME-PDG) ha sido el resultado de varios años de investigación en los Estados Unidos (AASHTO, 2008). Los modelos de predicción del deterioro utilizados por el ME-PDG requieren de calibración y un proceso de implementación a las prácticas locales. En particular, el desafío que presenta la implementación de la guía ME-PDG requiere de un esfuerzo de todos los grupos técnicos de cada país, para generar las bases de datos y modelos de calibración acordes con el clima, suelos, tráfico y materiales locales (Chang, Vidal, Loria, Bustos, & Delgadillo, 2013).

La guía (ME-PDG, 2008) refleja el estado del arte de las metodologías empleadas en el diseño de pavimentos nuevos y en la rehabilitación de pavimentos existentes. Considera el diseño de pavimentos flexibles y rígidos, empleando principios mecanicistas para el cálculo de esfuerzos, deformaciones, y deflexiones en la estructura de pavimento. Esta respuesta estructural se relaciona empíricamente con la evolución del deterioro estructural y funcional del pavimento, a lo largo de su vida útil.

Las variaciones climáticas y las cargas de tráfico son consideradas en el análisis para evaluar si la estructura de pavimento propuesta tiene la capacidad de soportar las cargas actuantes y cumplir con los niveles de servicio exigidos. El daño acumulado por acción de las cargas a través del tiempo, en la estructura propuesta, es anticipado con modelos de predicción del desempeño. Si el diseño de pavimento propuesto no supera los límites máximos tolerables de servicio establecidos, entonces se considera que es una alternativa técnicamente viable.

Para evaluar el desempeño del diseño de un pavimento, el ME-PDG utiliza modelos de predicción de tráfico, medio ambiente (EICM, Enhanced Integrated Climatic Model),



caracterización de materiales, respuesta estructural (FEM, Finite Element Method), evolución del deterioro o fallas y predicción del desempeño (Vivanco, 2016).

En el procedimiento de diseño mecanicista-empírico, el diseñador tiene la posibilidad de plantear estructuras de pavimento alternativas que deben cumplir con los niveles de servicio, verificando el desempeño estructural y funcional. Para esta verificación, los criterios de diseño están basados en niveles tolerables de deterioro, de acuerdo al tipo de pavimento. La Figura 2.12 resume la metodología empleada por los procedimientos mecanicistas-empíricos de diseño de pavimentos, donde se observa la necesidad de determinar las respuestas estructurales del pavimento propuesto, que permitan evaluar su desempeño a través de modelos de predicción de deterioro. Esto no es posible en métodos tradicionales como el de la AASHTO 93.

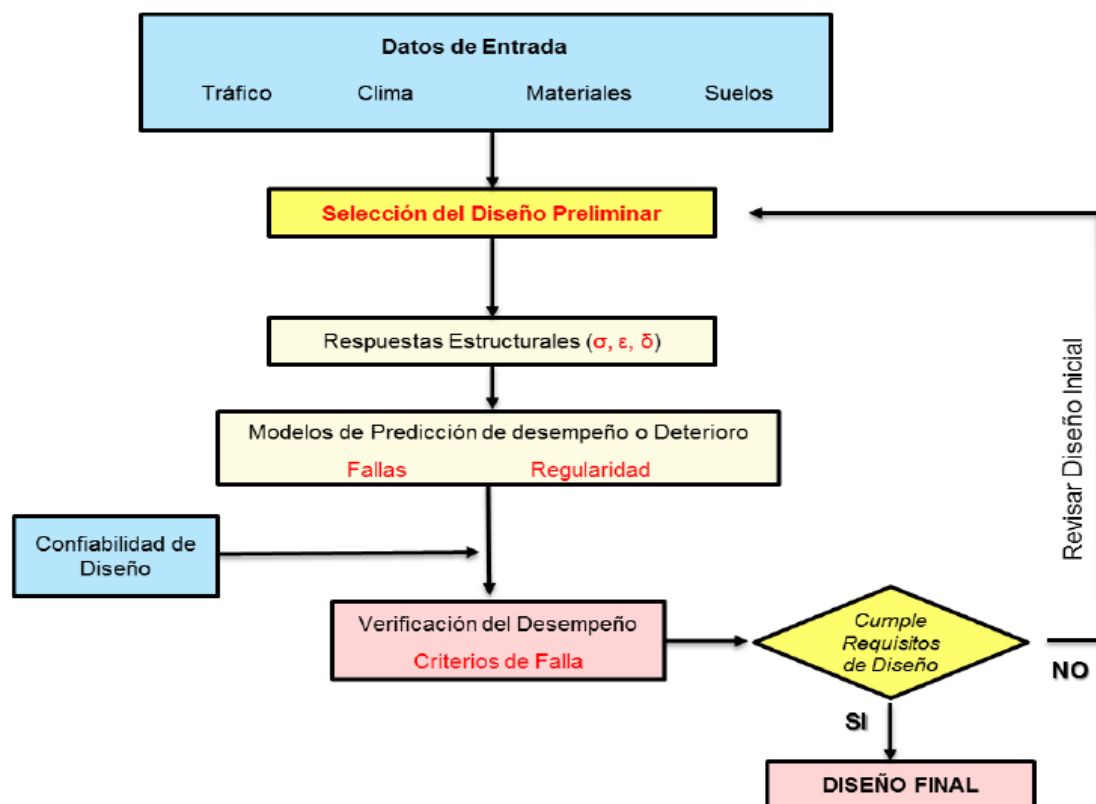


Figura 2.12. Diagrama de flujo del procedimiento utilizado para el diseño de pavimentos en la ME-PDG (Vivanco, 2016)



La AASHTO sugiere usar la guía AASHTO 1993 o un procedimiento de diseño específico de la agencia, para determinar el diseño de una sección transversal preliminar.

Los modelos de predicción de desempeño de pavimentos rígidos incluidos en la guía ME-PDG (AASHTO, 2008) para pavimentos rígidos de concreto con juntas (JPCP-Jointed Plain Concrete Pavements) son:

- ***Porcentaje de losas agrietadas (Cracking)***: El agrietamiento en las losas ocurre usualmente en el carril de tráfico más pesado y es el resultado de daño por fatiga. El agrietamiento puede producirse desde abajo hacia arriba cuando, los ejes del camión están cerca del borde longitudinal de la losa, a media distancia entre las juntas transversales; esto produce un esfuerzo de tracción por flexión crítico en la parte inferior de la losa bajo la carga de la rueda. Este esfuerzo aumenta cuando hay un alto gradiente de temperatura positivo a través de la losa (la parte superior de la losa es más caliente que la parte inferior de la losa). Las cargas repetidas de ejes pesados bajo esas condiciones resultan en daños por fatiga a lo largo del borde inferior de la losa, lo que eventualmente resulta en una grieta transversal que se propaga a la superficie del pavimento (AASHTO, 2008). El ME-PDG calcula el agrietamiento transversal ascendente, como un porcentaje del número total de losas. El parámetro de salida (porcentaje de losas con grietas transversales) combina el porcentaje de losas con grietas transversales de abajo hacia arriba y de arriba hacia abajo. Las grietas de arriba hacia abajo se producen, cuando la carga repetida de camiones pesados con cierto espaciado de ejes en pavimentos expuestos a altos gradientes de temperatura negativos (la parte superior de la losa más fría que la parte inferior de la losa) provoca daños por fatiga en la parte superior de la losa, que eventualmente resulta en una grieta transversal o diagonal que se inicia en la superficie del pavimento. La condición



crítica de carga de la rueda, para el agrietamiento de arriba hacia abajo, implica una combinación de ejes que cargan los extremos opuestos de una losa simultáneamente. En presencia de un gradiente de temperatura negativo, tales combinaciones de carga causan un esfuerzo muy alto de tensión en la parte superior de la losa cerca del borde crítico del pavimento. Este tipo de carga se produce con mayor frecuencia por la combinación de ejes de dirección y transmisión de tracto camiones y otros vehículos. Múltiples remolques, con espaciado entre ejes relativamente corto de remolque a remolque, son otras fuentes comunes de cargas críticas para el agrietamiento de arriba hacia abajo (AASHTO, 2008).

- ***Escalonamiento de juntas (Faulting)***: El escalonamiento de las juntas transversales es la elevación diferencial a través de la junta aproximadamente a 1 pie del borde de la losa (junta longitudinal para un ancho de carril convencional), o desde la franja del carril más a la derecha para una losa ensanchada. Debido a que el escalonamiento de las juntas varían significativamente de una junta a otra, el escalonamiento promedio de todas las juntas transversales en una sección de pavimento es el parámetro predicho por el ME-PDG. El escalonamiento es un mecanismo de deterioro importante en los JPCP debido a su impacto en la calidad de conducción. Los escalonamientos transversales son el resultado de una combinación de aplicaciones repetidas ejes de carga pesada, transferencia deficiente de la carga a través de la junta, humedad debajo de la losa de concreto, erosión de la capa de soporte base/subbase, subrasante o material de base del espaldón y curvatura hacia arriba de las losas (AASHTO, 2008).



- **Índice de Rugosidad Internacional (IRI):** El IRI (International Roughness Index) representa la regularidad en el perfil longitudinal del pavimento. La adecuada funcionalidad es cuantificada por la suavidad o regularidad del pavimento, tanto para pavimentos flexibles como rígidos. Las irregularidades en la capas de rodadura producen no solo la incomodidad del usuario, sino también mayores costos de operación del vehículo. El parámetro utilizado para definir la suavidad o regularidad del pavimento en el ME-PDG es el IRI, que se deriva de la simulación de un "quarter-car" que viaja a lo largo del perfil longitudinal de la carretera y se calcula a partir de la media de los perfiles longitudinales en cada huella de la rueda. El IRI se predice empíricamente en función de los deterioros del pavimento (escalonamiento y agrietamiento), factores de sitio, que representan las capacidades de contracción/hinchamiento y congelación de la cimentación, y una estimación del IRI en el momento de la construcción (IRI inicial). Los tipos de deterioro del pavimento que se ingresan para la predicción del IRI son una función del tipo de pavimento o rehabilitación considerado (AASHTO, 2008)

En la guía ME-PDG se pueden encontrar las ecuaciones de predicción de deterioro para pavimentos rígidos y capas superpuestas de concreto de cemento portland (PCC, Portland Cement Concrete), como modelos de predicción de daños o desempeño (funciones de transferencia) calibradas para el efecto. En este trabajo, debido a la falta de información requerida en los modelos de deterioro del pavimento por escalonamiento e IRI, únicamente se considerará la metodología y el modelo matemático utilizado para predecir el agrietamiento por fatiga en pavimentos rígidos de concreto simple con juntas (JPCP), y que se indica a continuación.



### 2.5.3.1 Ecuaciones de predicción de deterioro para el agrietamiento transversal

Para el agrietamiento transversal, se consideran los modos de abajo hacia arriba y de arriba hacia abajo. En condiciones de servicio típicas, la posibilidad de cualquier modo de agrietamiento está presente en todas las losas. Cualquier losa se puede agrietar de abajo hacia arriba o de arriba hacia abajo, pero no ambos. Por lo tanto, los agrietamientos ascendentes y descendentes previstos no son particularmente significativos por sí mismos, y se reporta el agrietamiento combinado.

El porcentaje de losas con grietas transversales (incluyendo todas las severidades) en un carril de tráfico dado se utiliza como medida del agrietamiento transversal y se predice usando la siguiente ecuación global, tanto para grietas de abajo hacia arriba como de arriba hacia abajo:

$$CRK = \frac{1}{1 + (DI_F)^{-1.98}} \quad \text{Ec. (2.26)}$$

Donde:

$CRK$  = Cantidad prevista de agrietamiento

$DI_F$  = Daño por fatiga

La expresión general para las acumulaciones de daños por fatiga, teniendo en cuenta todos los factores críticos para el agrietamiento transversal, es la siguiente (AASHTO, 2008):

$$DI_F = \sum \frac{n_{i,j,k,l,m,n,o}}{N_{i,j,k,l,m,n,o}} \quad \text{Ec. (2.27)}$$

Donde:

$DI_F$  = Daño total por fatiga (de arriba hacia abajo o de abajo hacia arriba)

$n_{i,j,k,...}$  = Número de aplicaciones de carga en condición i, j, k, l, m, n

$N_{i,j,k,...}$  = Número admisible de aplicaciones de carga en la condición i, j, k, l, m, n



$i$  = Edad (explica el cambio en el módulo de rotura y elasticidad del PCC, fricción del contacto entre la losa/base, deterioro de la eficiencia en la transferencia de carga en espaldones),

$j$  = Mes (explica el cambio en el módulo elástico de la capa de base y el módulo dinámico efectivo de reacción de la subrasante),

$k$  = Tipo de eje (simple, en tándem y tridem para agrietamiento de abajo hacia arriba; distancia entre ejes corta, media y larga para agrietamiento de arriba hacia abajo)

$l$  = Nivel de carga (carga incremental para cada tipo de eje)

$m$  = Diferencia de temperatura equivalente entre las superficies superior e inferior del PCC

$n$  = Desvío en la trayectoria del tráfico (distancia de la carga al borde del pavimento)

$o$  = Fracción de tráfico de camiones por hora

El número de aplicaciones de carga ( $n_{i,j,k,l,m,n}$ ) es el número real del tipo de eje  $k$ , del nivel de carga  $l$ , que pasó a través de la trayectoria de tráfico  $n$ , en cada condición (edad, estación y diferencia de temperatura). El número permitido de aplicaciones de carga es el número de ciclos de carga en los que se espera una falla por fatiga (que corresponde al 50 por ciento de agrietamiento de la losa) y es una función del esfuerzo aplicado y la resistencia del PCC. El número permitido de aplicaciones de carga se determina usando la ecuación de fatiga (AASHTO, 2008):

$$\log(N_{i,j,k,l,m,n}) = C_1 \left( \frac{MR_i}{\sigma_{i,j,k,l,m,n}} \right)^{C_2} \quad \text{Ec. (2.28)}$$

Donde:

$N_{i,j,k,\dots}$  = Número admisible de aplicaciones de carga en la condición  $i, j, k, l, m, n$

$MR_i$  = Módulo de rotura del PCC a la edad  $i$ , en psi

$\sigma_{i,j,k,\dots}$  = Esfuerzo aplicado en las condiciones  $i, j, k, l, m, n$

$C_1$  = Constante de calibración, 2.0

$C_2$  = Constante de calibración, 1.22





El cálculo del daño por fatiga es un proceso de suma del daño de cada incremento de daño. Una vez que se estiman los daños ascendentes y descendentes, se calcula el agrietamiento correspondiente, utilizando la *Ec. (2.26)* y se determina el agrietamiento total combinado con la ecuación *Ec. (2.29)*.

$$TCRACK = (CRK_{Bottom-up} + CRK_{Top-down} - CRK_{Bottom-up} CRK_{Top-down})100\% \quad Ec. (2.29)$$

Donde:

$TCRACK$  = Agrietamiento transversal total, en porcentaje (todas las severidades)

$CRK_{Bottom-up}$  = Cantidad prevista de grietas transversales de abajo hacia arriba, en fracción

$CRK_{Top-down}$  = Cantidad prevista de grietas transversales de arriba hacia abajo, en fracción

En la Figura 2.13 se muestra un gráfico del agrietamiento transversal medido versus el pronosticado y los resultados estadísticos del proceso de calibración global.

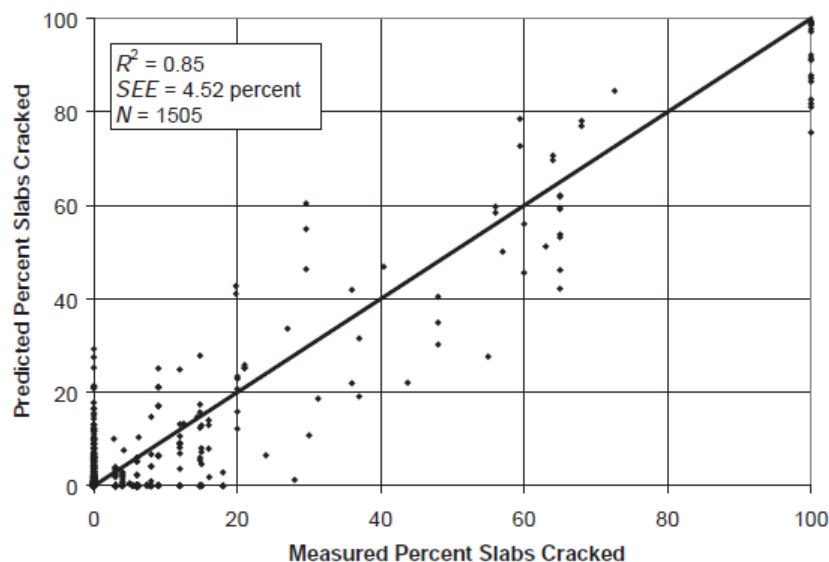


Figura 2.13. Comparación de porcentajes medidos y pronosticados de losas agrietadas (AASHTO, 2008)



## 2.6 Métodos de elementos finitos para el análisis de pavimentos rígidos

En términos generales, el método de elementos finitos consiste en la separación del problema en pequeños elementos discretos de geometría dada (malla), la formulación de ecuaciones de variación de esfuerzo y deformación a través de cada elemento individual, para luego aplicar requisitos de equilibrio que permiten combinar los elementos individuales y obtener la formulación para el problema global en términos de un conjunto de ecuaciones simultáneas, cuya solución resulta en una aproximación de la solución verdadera. La Tabla 2.6 presenta un resumen de programas de elementos finitos disponibles para el análisis de pavimentos rígidos (Hernández López, 2013). En general se observa que la mayoría de programas consideran a la losa como un elemento tipo placa delgada, con un comportamiento linealmente elástico, y a la cimentación como un macizo de Winkler.

Tabla 2.6 Resumen de programas de elementos finitos disponibles para el análisis de pavimentos rígidos

Programa MEF	Dimensión	Losa	Subrasante	Material	Pasador	Carga	Formulación
ILLI-SLAB	2D	Elemento de placa delgada	Macizo de Winkler	Linealmente elástico	Barras discontinuas	Estática	Desplazamiento
WESLIQID	2D	Elemento de placa delgada	Macizo de Winkler	Linealmente elástico	-	Estática	Desplazamiento
WESLAYER	2D	Elemento de placa delgada	Capas lineales y elásticas / Medio sólido y elástico	Linealmente elástico	-	Estática	Desplazamiento
KENSLABS	2D	Elemento de placa delgada	Macizo de Winkler / Medio sólido elástico / Capas elásticas	Linealmente elástico	Barras discontinuas	Estática	Desplazamiento
RISC	2D	Elemento de lámina fina y elástica	Medio sólido elástico / Capas elásticas	Linealmente elástico	-	Estática	Desplazamiento
JSLAB	2D	Elemento de placa delgada	Macizo de Winkler	Linealmente elástico	Consideró espaciamientos no uniformes	Estática	Desplazamiento
FEACONS	2D	Elemento de placa delgada	Macizo de Winkler	Linealmente elástico	Rigidez lineal y torsional de la junta	Estática	Desplazamiento
DYNA-SLAB	2D	Elemento de placa delgada	Amortiguadores de Winkler / Capas sólidas	Linealmente elástico	-	Dinámica	Desplazamiento
EVERFE	3D	Elemento cuadrático y hexaédrico	Macizo de Winkler	Linealmente elástico	Elementos embebidos	Estática	Desplazamiento

Fuente: (Hernández López, 2013)



### 2.6.1 Respuestas del modelo estructural de pavimentos rígidos

La calibración de procedimientos de diseño mecanicista implican la aplicación de modelos estructurales para calcular las respuestas del pavimento, el desarrollo de modelos de deterioro para predecir el daño que puede sufrir el pavimento bajo esas respuestas estructurales y la calibración del deterioro pronosticado con el deterioro observado en pavimentos en servicio (Huang, 2004b). Los modelos estructurales para el análisis de pavimentos rígidos están más avanzados que los modelos de deterioro. Se pueden usar varios programas de elementos finitos como modelos estructurales, pero la mayoría de los modelos de deterioro son ecuaciones de regresión derivadas empíricamente, con una gran dispersión de datos.

Para analizar con precisión los sistemas de pavimento rígido, el Informe 1-26 del National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), publicado en 1990, indica que los modelos estructurales utilizados deben tener las siguientes capacidades mínimas (Huang, 2004b):

- Analizar losas de cualquier dimensión.
- Analizar sistemas con dos capas (losa y subbase), ya sea unidas o no, con las mismas o diferentes propiedades de materiales.
- Analizar sistemas de losas sobre una subrasante líquida o sólida.
- Analizar sistemas de losas con soporte uniforme o no uniforme, de manera que se pueda tener en cuenta la pérdida de soporte debido a la erosión u otras causas.
- Analizar múltiples losas con transferencia de carga a través de las juntas o grietas.
- Considerar el alabeo de losas simultáneamente con las respuestas de carga.
- Analizar losas con espaciamientos variables de fisuras para el diseño de CRCP.



- Analizar losas con cualquier condición de carga arbitraria, incluyendo ruedas simples o múltiples, presiones variables de los neumáticos y cargas aplicadas a distancias asignadas arbitrarias de grietas, juntas o bordes de losas.
- Analizar los sistemas de pavimento con condiciones arbitrarias de espaldones, incluyendo espaldones de asfalto, espaldones de concreto con barras de unión y carriles de circulación extendidos.
- Analizar sistemas con espesores no uniformes de losas o espaldones.

### 2.6.2 Software KENSLABS.

El programa KENSLABS (Huang, 2004a) se basa en el método de elementos finitos (de forma rectangular), en el que, tanto las cargas de las ruedas como las reacciones de la subrasante se aplican a la losa como fuerzas verticales concentradas en los nodos. En sus dimensiones actuales, se puede aplicar a un máximo de 6 losas, 7 juntas y 420 nodos. Cada losa puede tener un máximo de 15 nodos en la dirección  $x$  y 15 nodos en la dirección  $y$ . El análisis de daños se puede hacer dividiendo cada año en un máximo de 12 períodos, cada uno con un máximo de 12 grupos de carga. Las principales capacidades y limitaciones del programa son:

- ***Capacidades del software:***
  - Se puede analizar un máximo de seis losas con transferencia de corte y momento a través de las juntas. La transferencia de corte se puede efectuar especificando una constante de resorte de corte o proporcionando información sobre el tamaño, el espaciado, el módulo de Young y la relación de Poisson de los pasadores, junto con el ancho de la junta y el módulo del soporte del pasador. Los pasadores pueden tener o no espaciamientos uniformes a lo largo



de una junta. La transferencia de momento se especifica mediante una constante de resorte de momento. Los pasadores flojos se pueden considerar especificando un espacio o hueco entre el pasador y el concreto.

- Cada losa puede tener diferentes espesores y tamaños. En la misma losa, el espesor puede variar de un nodo a otro. Sin embargo, dos losas contiguas deben tener el mismo ancho, y todas las juntas deben ser continuas a lo largo de la losa.
- Las losas pueden tener dos capas rígidas, unidas o no unidas. Cada capa tiene su propio módulo de Young y relación de Poisson.
- La carga puede distribuirse uniformemente sobre áreas rectangulares o concentrarse en un número dado de nodos. Cada área cargada puede tener una intensidad de presión diferente.
- Si existe simetría con respecto a uno o ambos ejes, se puede considerar solo la mitad o un cuarto del sistema de losas. Esta característica puede ahorrar una gran cantidad de tiempo de computadora y almacenamiento.
- Se puede analizar el efecto del alabeo de las losas por temperatura y los espacios entre la losa y la base sobre los esfuerzos y deflexiones.
- Se puede asumir que la losa y la base están en pleno contacto en todos los nodos o que no están en contacto en algunos nodos designados. La condición de contacto también puede evaluarse automáticamente mediante iteraciones.
- El programa puede analizar losas sobre bases líquidas, sólidas o de capas.

- ***Limitaciones del software:***

- Cuando se considera el alabeo por temperatura, se asume que cada losa se curva en una superficie esférica independiente de los demás. Esto ocurre solo



cuando no hay transferencia de momento a través de las juntas, y cada losa puede moverse hacia arriba y hacia abajo libremente, como en el caso de las juntas con pasadores lubricados. Puede no ser aplicable a juntas longitudinales, donde los bordes de las losas contiguas se mantienen fuertemente unidos. Afortunadamente, el área más crítica para un pavimento no está cerca de una junta longitudinal, por lo que esta inexactitud debería tener muy poco efecto en el diseño final. El análisis de la curvatura por temperatura se basa en la suposición de que solo hay una capa de losas y que cada losa es de espesor uniforme. Para las losas de espesor no uniforme, se debe suponer un espesor promedio.

- El programa no permite el uso de juntas infinitamente rígidas, donde las deflexiones o rotaciones en los dos lados de la junta son iguales. Cuando se aplica una constante de resorte muy grande a una junta, la ecuación para cada nodo en los dos lados opuestos es idéntica y el sistema de ecuaciones simultáneas se vuelve singular.
- El uso de elementos rectangulares limita severamente el tamaño de los elementos a ser empleados. Si se usan elementos pequeños en la losa principal, los elementos en las losas adyacentes serán del mismo ancho pequeño. La limitación de que la relación longitud-ancho de cualquier elemento no sea superior a 4 o 5 requiere una gran cantidad de elementos para ser utilizados en todo el sistema de losa. Si están involucradas muchas losas, se debe usar un mallado relativamente grande para ahorrar tiempo y almacenamiento en la computadora.



- El programa puede determinar únicamente los esfuerzos en las losas de concreto y las deflexiones de la losa y la base. Los esfuerzos en la base sólida o de capa no se pueden obtener.



### 3 Determinación de parámetros a utilizarse en la modelación

En este capítulo, a partir de información recopilada de la bibliográfica, diseños, memorias técnicas, especificaciones y procesos constructivos de las vías con pavimento rígido que se ejecutan dentro del Programa Barrio para Mejor Vivir en la ciudad de Cuenca, se determinan los valores de los parámetros a ser utilizados en la modelación, y que permitirán obtener los esfuerzos y deformaciones que se producen en las losas del pavimento.

#### 3.1 Geometría de vías

La geometría de las vías urbanas de la ciudad de Cuenca varía según la jerarquía establecida en el Plan de Movilidad y Espacios Públicos 2015-2025 (GAD Municipal de Cuenca, 2015b) que las clasifican en expresas, arteriales, colectoras y locales, cuyas características principales se resumen en la Tabla 3.1.

*Tabla 3.1. Clasificación y características de las vías urbanas del cantón Cuenca*

Tipo de Vía	Función	Velocidad de Circulación (km/h)	Sentidos de flujo	Nro. de Carriles por Sentido	Vías de este tipo
<b>Expresa</b>	Establecen la relación entre el sistema interurbano y el sistema vial urbano, principalmente sirve para el tráfico de paso, origen y destino distantes entre sí, la circulación se da a altas velocidades y bajas condiciones de accesibilidad, en su recorrido no se permite el estacionamiento, la carga y descarga de mercancías.	90	2	3 o más	Vía rápida Cuenca-Azogues
<b>Arterial</b>	Forman la red principal estructural del sistema viario urbano, especializado en viajes a escala de ciudad ya que conectan los accesos exteriores con las distintas partes de la ciudad. Es un viario urbano cuya principal función es canalizar tráfico motorizados.	50	2	2 o más	Ave. De las Américas, Doce de Abril, Paseo de los Cañaris, Diez de Agosto, España, Gonzáles Suarez, Héroes de Verdeloma, Huayna Capac, Larga, Ordóñez Lasso, Primero de Mayo, Solano, Unidad Nacional, 24 de Mayo entre otras.
<b>Colectora</b>	Son las encargadas de garantizar el acceso a los barrios, distribuyendo los tráfico desde el viario arterial hacia la red local, o bien sirviendo de salida de los barrios con destino al viario principal. Se trata pues de un viario intermedio en el que predominan los movimientos urbanos. La planificación de transporte público en la ciudad considera estas vías para el paso de las diferentes rutas urbanas.	50	2	1 o 2	Camino a Baños, Llacao, Mayancela, Ochoa León, Patamarca, Ricaurte, San Joaquín, Turi, calles como la Abelardo J. Andrade, Don Bosco, Pío Bravo, Remigio Crespo, Mariano Cueva, Del Estadio, Tejar, Escandón, Lamar, Gran Colombia, Loja, Andes, México, Paucarbamba, Gil Ramírez Dávalos, Turhuayco, Viracochabamba, Yanahurco.
<b>Local</b>	Están constituidas principalmente por aquellas vías donde los movimientos predominantes son o deben ser, los de acceso a los destinos finales, fundamentalmente residencia. Los tráfico de paso o en tránsito deberían ser minoritarios y prevalecen los tráfico peatonales, permiten el estacionamiento, no siempre regulado. Las tres cuartas partes del viario corresponden a vías locales.	50	2	1 o 2	Berlín, Cantón Balzar, Cantón Choroleg, De la Cidra, De la Higuera, De la Magnolia, Diego de Tapia, Francisco Morales, Fray Luis de Granada, Paquisha, Calles de Retorno, etc.





Todas las vías urbanas construidas con pavimento rígido dentro de la ciudad de Cuenca constan de una calzada, sin espaldones y confinadas lateralmente, ya sea con veredas, bordillos y/o muros de mampostería de piedra. El número de carriles, sentidos de circulación, jardineras, parterre y zonas de parqueo es variable, incluso dentro de las vías de un mismo nivel jerárquico. Los sentidos de circulación están separados mediante parterres, bordillos o únicamente con señalización horizontal, al igual que las zonas de parqueo y anchos de losas extendidas. Los anchos más comunes que tienen los carriles de circulación de las vías arteriales, colectoras y locales se indican en la Figura 3.1. El ancho de carril más común es de 3.00 m y corresponde a las vías locales, mientras que las vías arteriales y colectoras tienen anchos de carril mayores a 3.50 m.

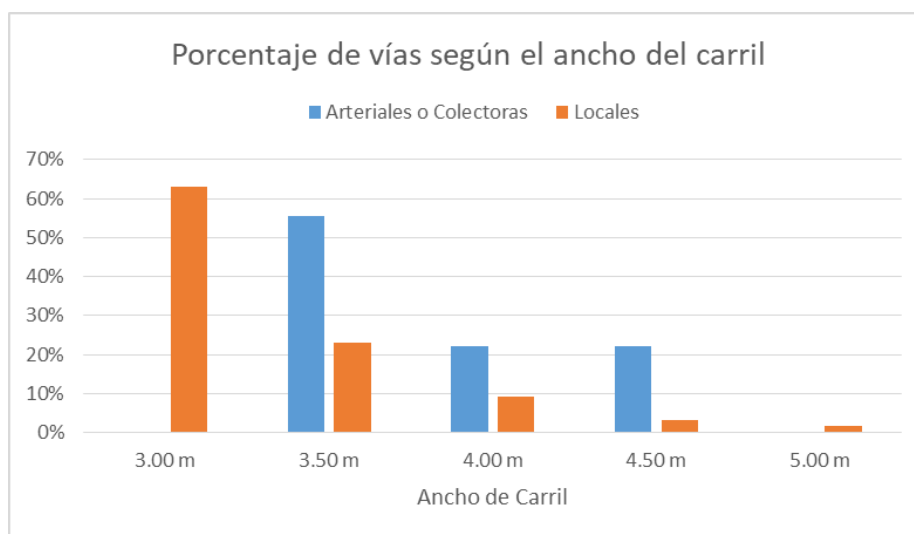


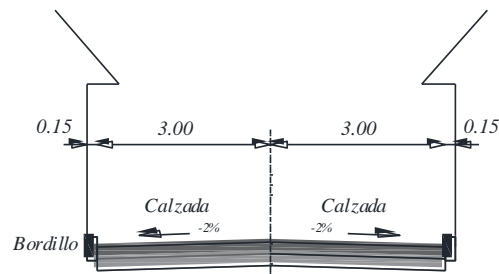
Figura 3.1. Anchos típicos de carriles de circulación de vías arteriales, colectoras y locales

### 3.1.1 Secciones transversales y dimensiones de losas

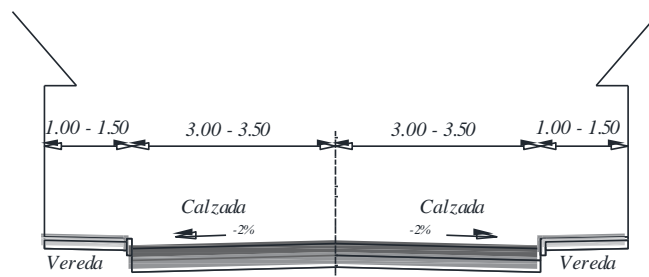
En la Figura 3.2 se muestran algunos ejemplos de secciones transversales típicas de las calles construidas con pavimento rígido en la ciudad de Cuenca. Las vías con un ancho



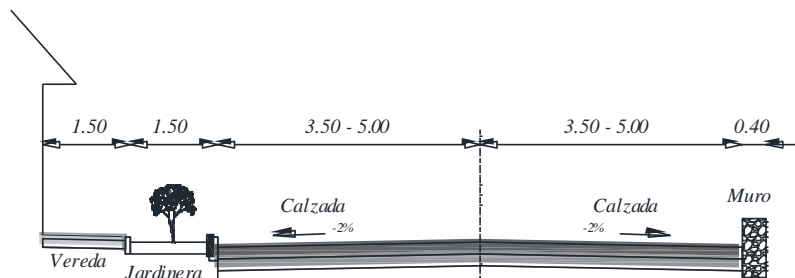
total de calzada que supera los 10.00 m generalmente tienen dos carriles de circulación por sentido.



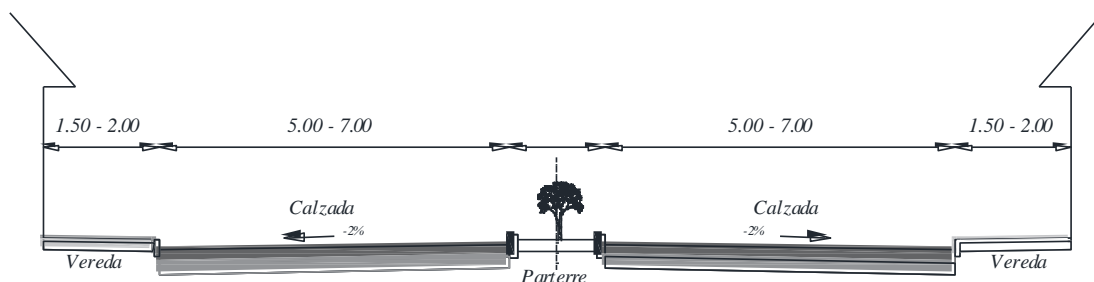
(a) Sección Típica de Vías Locales



(b) Sección Típica de Vías Locales



(c) Sección Típica de Vías Colectoras



(d) Sección Típica de Vías Colectoras o Arterial

Figura 3.2. Ejemplos de secciones transversales típicas de vías con pavimento rígido en Cuenca



Por ser las más comunes en nuestro medio, en la modelación se analizarán las vías con carriles de circulación de 3.00, 3.50, 4.00, 4.50 y 5.00 m de ancho, confinadas lateralmente.

Las dimensiones de las losas (denominadas comúnmente en nuestro medio como paños) también varían con el ancho de las calzadas como se indica en la Figura 3.3.

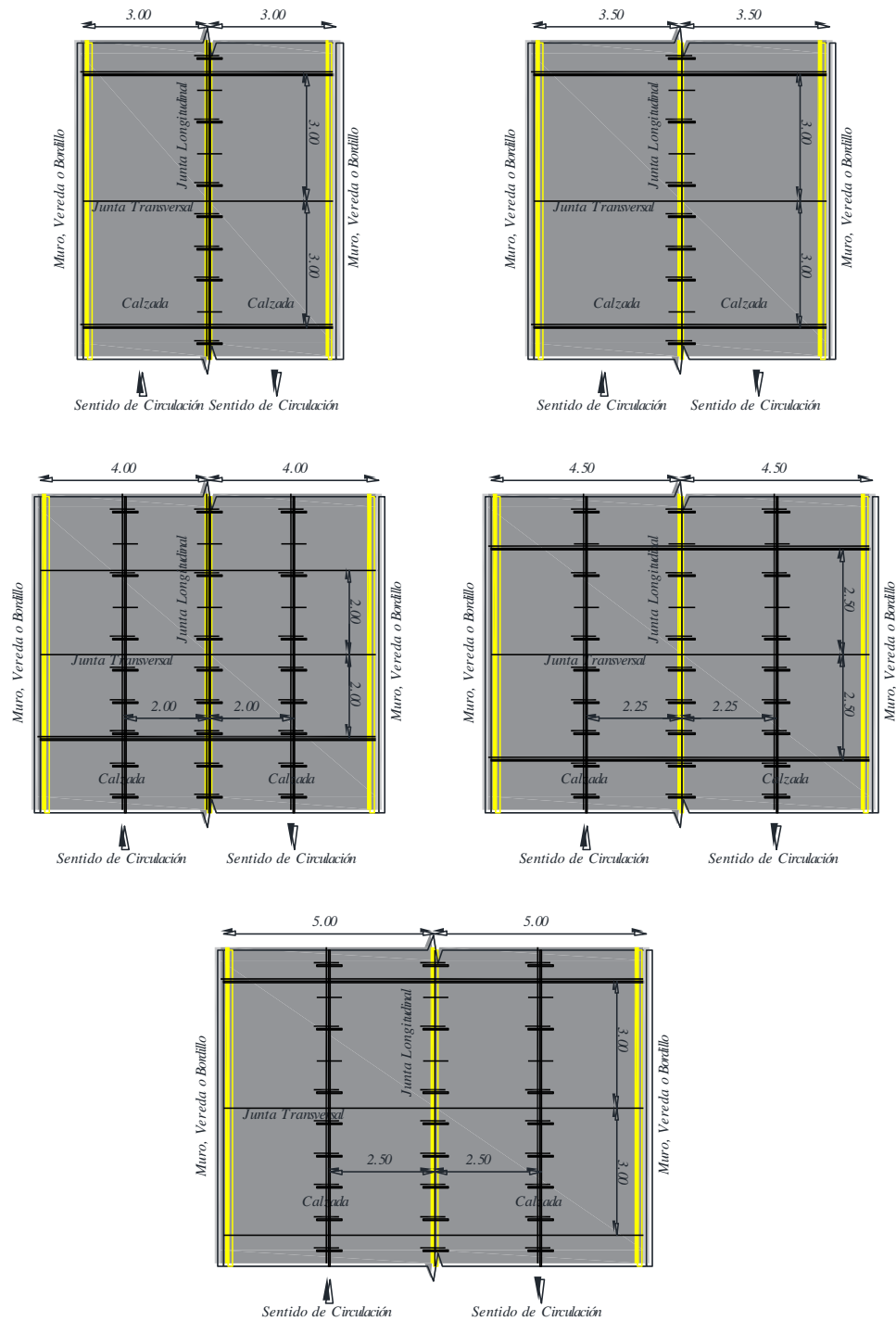


Figura 3.3. Dimensiones típicas de las losas de pavimento rígido

La figura anterior muestra la práctica común actualmente utilizada para la construcción de las vías analizadas, donde, una junta longitudinal de construcción coincide con el ancho del carril de circulación, y si éste supera los 3.50 m, se adiciona una junta



longitudinal intermedia. El espaciamiento de las juntas transversales cumple con las recomendaciones estipuladas en la bibliografía (Huang, 2004b): separaciones de juntas de contracción menores a 24 veces el espesor de la losa y valores menores a 1.25 de la relación entre el largo (L) y el ancho (A) de una losa (o paño) como se resume en la Tabla 3.2 para las 78 vías contempladas en este estudio.

*Tabla 3.2. Dimensiones típicas de las losas (o paños) según el ancho del carril de circulación*

Ancho del carril de circulación	L = Largo de las losas (delimitado por una junta transversal)	A = Ancho de las losas (delimitado por una junta longitudinal)	Relación = Largo / Ancho $L / A < 1.25$	Separación de juntas de contracción $< 24 h$ $24 h = 24 \times 16 = 384 \text{ cm}^*$
3.00 m	3.00	3.00	1.00 - Cumple	3.00 - Cumple
3.50 m	3.00	3.50	0.86 - Cumple	3.00 - Cumple
4.00 m	2.00	2.00	1.00 - Cumple	2.00 - Cumple
4.50 m	2.50	2.25	1.11 - Cumple	2.50 - Cumple
5.00 m	3.00	2.50	1.20 - Cumple	3.00 - Cumple

\*Nota: Se ha considerado un espesor de losa  $h = 16 \text{ cm}$ , debido a que es el menor espesor de losa encontrado en las vías estudiadas

En la modelación se analizarán vías construidas con losas de 3.00x3.00, 3.00x3.50, 2.00x2.00, 2.50x2.25 y 3.00x2.50 m (largo x ancho), y que corresponden a carriles de circulación con anchos de 3.00, 3.50, 4.00, 4.50 y 5.00 m respectivamente, como se indica en la Figura 3.3.

### 3.1.2 Espesores de capas que conforman las estructuras de pavimentos

Los diseños existentes consideran espesores de losas de concreto de 16 o 17 cm para vías locales; 19, 20 o 21 cm para vías colectoras y 22 cm para vías arteriales. La losa de concreto está diseñada sobre una capa de subbase granular de 15, 20, 25 o 30 cm de espesor, que a su vez está colocada sobre la subrasante natural previamente acondicionada como se indica en la Figura 3.4. En los diseños se recomienda el uso de material de mejoramiento o pedraplén para reponer material en zonas inestables de la subrasante.

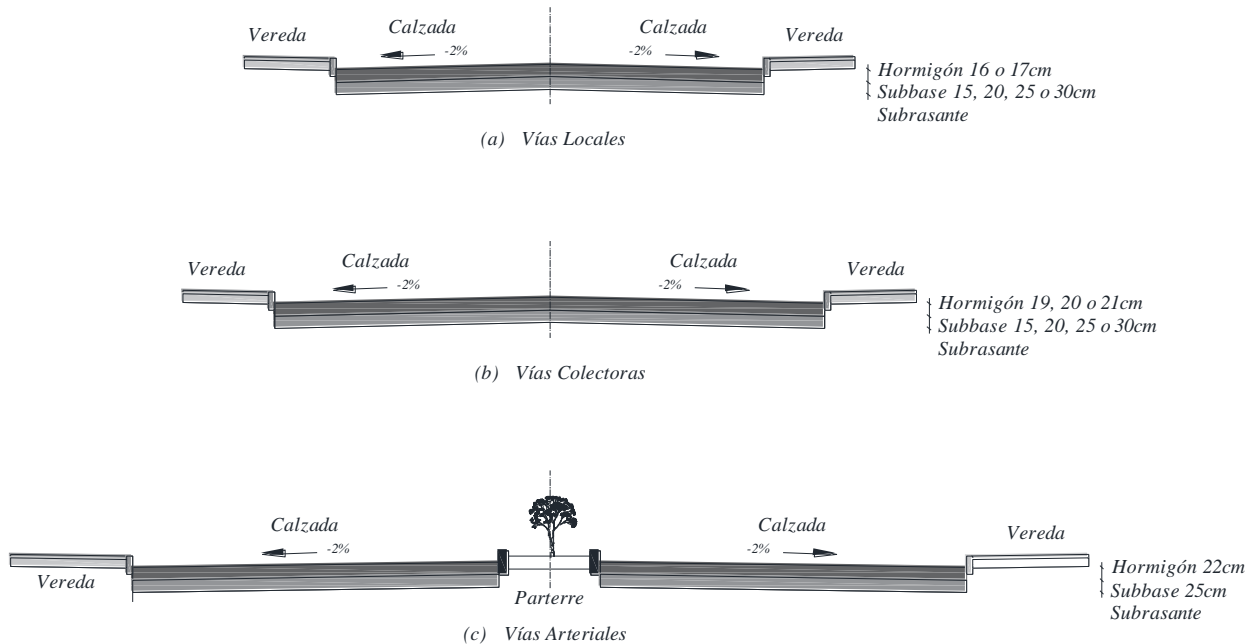


Figura 3.4. Estructuras típicas de pavimentos rígidos consideradas en los diseños

El espesor mínimo de losas considerado en los diseños es 16.00 cm y corresponde a vías locales de tipo retorno (ingreso y salida de vehículos por una misma intersección). En la modelación se analizarán las losas de pavimento utilizadas en vías locales, colectoras y arteriales.

### 3.2 Propiedades de los materiales

Las propiedades de los materiales que conforman las estructuras de pavimento rígido de las vías en la ciudad de Cuenca, han sido obtenidas directamente de los diseños existentes, en base a los cuales se construyeron las mismas. Puesto que se asume el total cumplimiento de las especificaciones técnicas que rigen para la construcción de las vías, no se realizaron pruebas de campo o ensayos de laboratorio para su comprobación.

Luego de revisar las memorias técnicas de los diseños de pavimento, se puede decir que el nivel jerárquico de la información considerada en los diseños corresponde a un Nivel 2

(según la clasificación del método ME-PDG de la AASHTO 2008), en el que un parámetro de entrada es calculado a partir de correlaciones o ecuaciones de regresión, brindando un nivel intermedio de precisión, y es recomendado para proyectos de mediano tráfico.

A continuación se presenta la información sobre las propiedades y características que deben cumplir las diferentes capas de material que forman parte de las estructuras de pavimento, y que están contempladas en las respectivas memorias y especificaciones técnicas.

### 3.2.1 Capa de subrasante

Los estudios más extensos sobre el comportamiento de los pavimentos rígidos consideran a la subrasante como una cimentación de Winkler, asumiendo ésta como un conjunto de resortes independientes. En este tipo de cimentaciones, el parámetro más importante es el Módulo de Reacción de la Subrasante ( $k$ ), que puede ser determinado mediante un ensayo de carga de placa como se indica en la Figura 3.5. El valor de  $k$  se obtiene dividiendo la presión ejercida sobre una placa, circular para la deformación producida,  $k = p / \Delta$ .

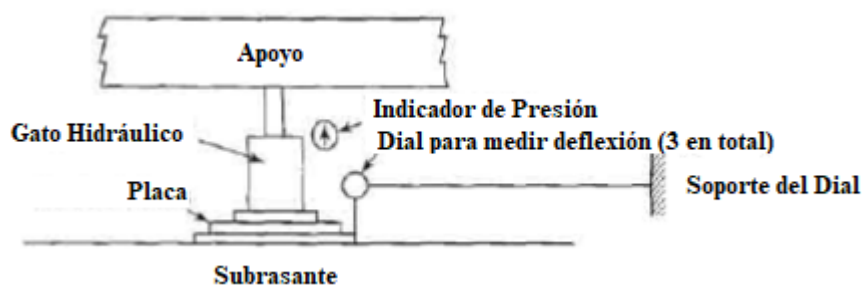


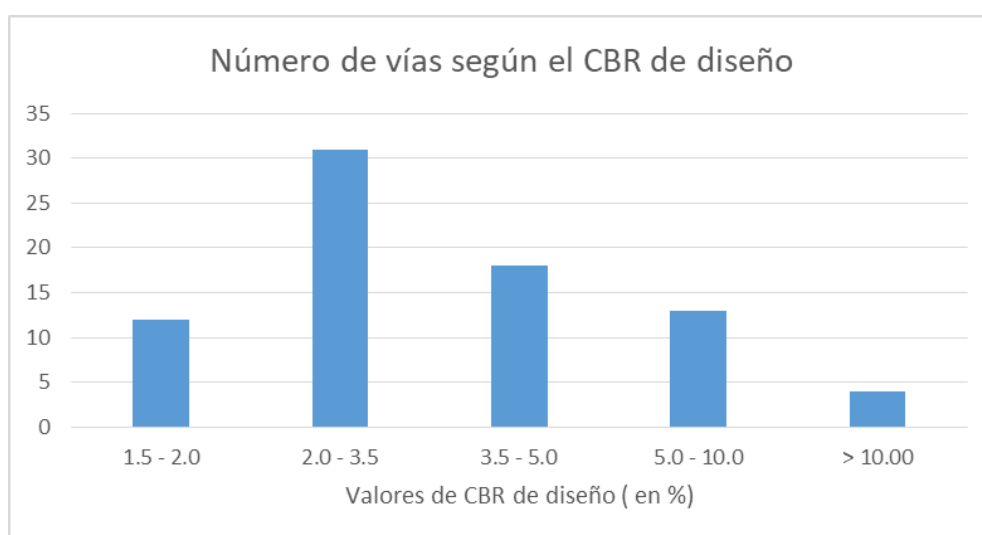
Figura 3.5. Ensayo de carga de placa para determinar el módulo de reacción de la subrasante (Huang, 2004b)

Para el diseño de las vías urbanas con pavimento rígido en la ciudad de Cuenca, las propiedades físicas y la resistencia de los suelos de subrasante se han obtenido mediante



exploración del subsuelo con excavaciones a cielo abierto (pozos de hasta 1.50 m de profundidad), realizando sobre éstos ensayos de campo y laboratorio. Los módulos de reacción de la subrasante ( $k$ ) han sido obtenidos mediante correlaciones establecidas con valores de CBR, módulos resiliente, espesores de capa de subbase y módulos de elasticidad de la subbase. Los valores relativos de soporte (CBR) en estratos de suelos finos, han sido determinados a través de pruebas realizadas con el Cono de Penetración Dinámico, mientras que en los suelos granulares los valores de CBR han sido obtenidos a través de ensayos de laboratorio en muestras remoldeadas.

Los valores de CBR de subrasante, considerados en los diseños, corresponden a diferentes percentiles (75, 87.5 o 95) utilizados por cada consultor, y que son calculados a partir de todos los valores de CBR obtenidos de ensayos en un determinado sector de la ciudad (barrio o parroquia) a ser intervenido con los programas de pavimentación. Con la información contemplada en las memorias técnicas se clasificó las vías de acuerdo al CBR de diseño como se indica en la Figura 3.6.



*Figura 3.6. Valores de CBR de subrasante considerados en los diseños*





Aproximadamente, unas 50 calles (que corresponden al 70% de las vías consideradas en los diseños) tienen un valor de CBR de subrasante entre 2 y 4 (similares a los encontrados en las subrasantes de las carreteras de prueba de la AASHO), y que generalmente están constituidas por estratos de suelos finos de consistencia blanda, que pueden ser susceptibles de erosión por acción de tráfico; por lo que será necesario el uso subrasantes mejoradas y/o la colocación de capas intermedias de subbase o base entre la losa y la subrasante. Además, por lo general los consultores recomiendan el uso de capas de pedraplén para reponer material de subrasantes cuyo CBR sea menor a 1.50.

Los CBRs de diseño son utilizados en fórmulas de correlación para obtener el módulo resiliente de la subrasante ( $M_R$ ), que junto al espesor de la capa de subbase ( $D_{SB}$ ) a utilizar y el módulo de elasticidad de la subbase ( $E_{SB}$ ), permiten determinar el módulo de reacción efectivo de la subrasante, de acuerdo a lo estipulado en la guía de la AASHTO (AASHTO, 1993). Las ecuaciones Ec. (3.1) y (3.2) se han empleado en los diseños para correlacionar el módulo resiliente y módulo de reacción de la subrasante con el CBR.

$$M_R = 180 \cdot CBR^{0.64} \quad \text{para } 2\% < CBR < 12\% \quad \text{Ec. (3.1a)}$$

$$M_R = 180 \cdot CBR^{0.55} \quad \text{para } 12\% < CBR < 80\% \quad \text{Ec. (3.1b)}$$

$$k = 2.55 + 52.50 \cdot \log CBR \quad \text{para } CBR < 10\% \quad \text{Ec. (3.2a)}$$

$$k = 46.00 + 9.08 \cdot (\log CBR)^{4.34} \quad \text{para } CBR > 10\% \quad \text{Ec. (3.2b)}$$

Donde:

$M_R$  = Módulo resiliente de la subrasante en  $\text{kg/cm}^2$

$CBR$  = Valor relativo de soporte en porcentaje

$k$  = Módulo de reacción de la subrasante en  $\text{MPa/m}$

En ninguno de los diseños se menciona la presencia de estratos rígidos a profundidades menores de 3.00 m, ni tampoco el daño relativo para considerar el efecto



estacional del clima. La corrección del módulo de reacción de la subrasante, en base a una posible pérdida de soporte ( $LS$ ) de la capa de subbase, sí es considerada en algunos diseños asumiendo un valor de  $LS=1$ .

El porcentaje de vías clasificado de acuerdo al valor del módulo de reacción de la subrasante ( $k$ ) se indica en la Figura 3.7.

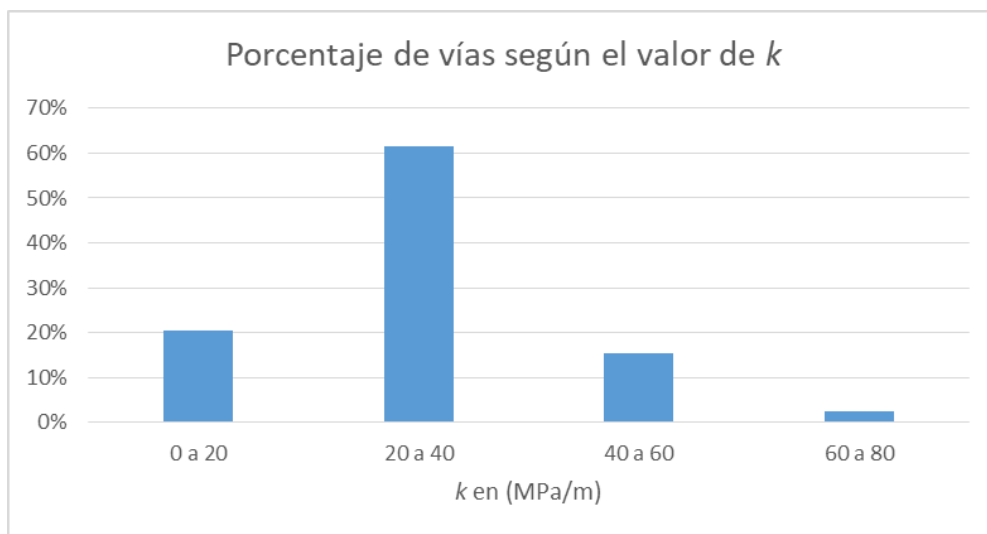


Figura 3.7. Valores del módulo de reacción de la subrasante ( $k$ ) considerados en los diseños de vías

El valor promedio del módulo de reacción de la subrasante natural de las vías consideradas en los diseños, está alrededor de 30.00 MPa/m (110.70 pci). Estos valores son utilizados conjuntamente con los espesores de capa de subbase a ser colocados, de tal forma que permitan obtener el módulo de reacción de la subrasante-subbase ( $k_{\text{combinado}}$ ) como se indica a continuación, cuyo valor se considera en las fórmulas para determinar el espesor de losa requerido.

### 3.2.2 Capa de subbase.

Todas las vías construidas con pavimento rígido en la ciudad de Cuenca tienen una capa intermedia de material (base, subbase, mejoramiento o en ciertos casos muy específicos



una capa de base tratadas con cemento), colocadas entre la subrasante natural y la losa de pavimento. No se han construido vías donde las losas de concreto hidráulico estén colocadas directamente sobre la subrasante natural.

Este estudio se centrará en las estructuras de pavimento que contienen una capa de subbase granular no tratada, cuyas características están estipuladas en las especificaciones técnicas que acompañan a los diseños respectivos y se indican en la Tabla 3.3.

*Tabla 3.3. Especificaciones técnicas para material de subbase contempladas en los diseños*

Parametro	Valor Requerido	
	Tamiz	% Que Pasa
Granulometría	3"	100
	No. 4	30 - 70
	No. 200	0 - 20
Porcentaje de desgaste (Ensayo AASHTO T-96)	< 50%	
Límite Líquido (porción pasante el tamiz No. 40) (Ensayo AASHTO T-89)	< 30	
Índice de Plasticidad (porción pasante el tamiz No. 40), Ensayo (AASHTO T-90)	< 9	
Valor Relativo de Soporte (CBR)	> 30%	

El CBR de la subbase puede ser utilizado, para mediante correlaciones (Figura 3.8), obtener el módulo de elasticidad de la subbase ( $E_{SB}$ ), y que a su vez es necesario para determinar el módulo de reacción combinado de subbase-subrasante ( $k_{combinado}$ ) en el método de la AASHTO 1993 (Figura 3.9) o mediante tablas similares a las del método de la PCA (Tabla 3.4). En los diseños el valor de  $k_{combinado}$  se determina de estas dos formas.

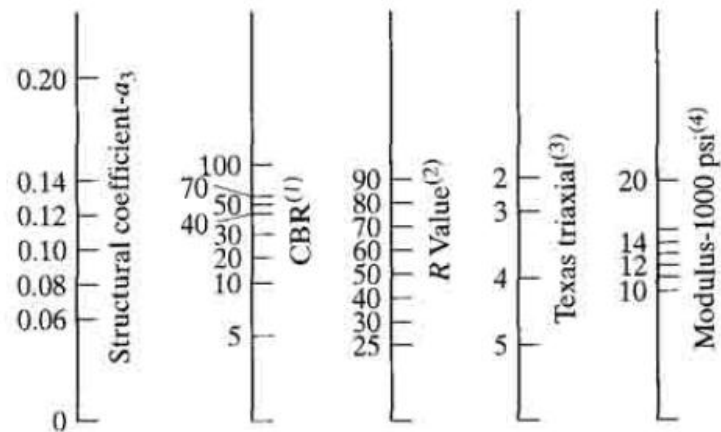


Figura 3.8. Correlaciones entre diferentes parámetros de subbases (AASHTO, 1993)

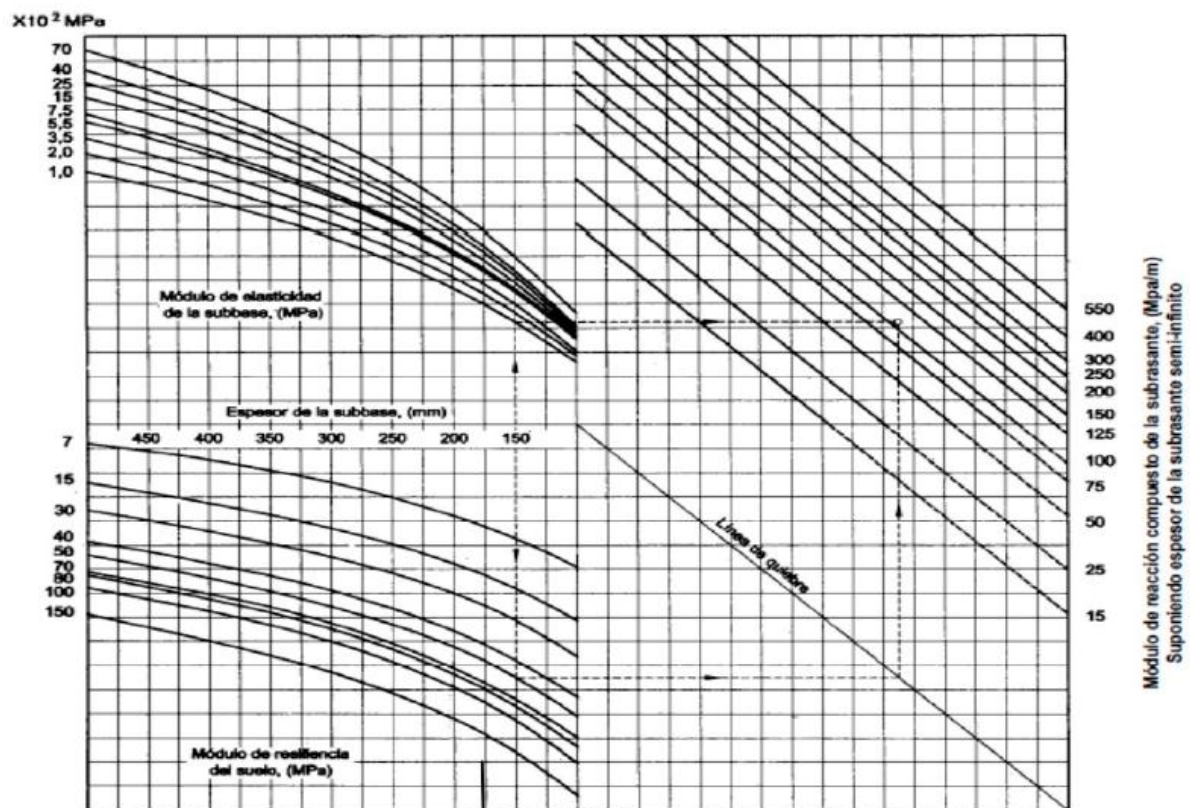


Figura 3.9. Carta para determinar el módulo de reacción combinado (AASHTO, 1993)



Tabla 3.4. Tablas para determinar el módulo de reacción combinado en el método de la PCA (Packard, 1984)

Efecto de la subbase (no tratada) sobre el valor de k				
Valor de k de la subrasante (MPa/m)	Valor de k combinado (subrasante-subbase) (MPa/m)			
	10 cm	15 cm	23 cm	30 cm
14	18	20	23	30
27	35	38	43	52
54	60	62	73	87
81	87	90	100	117

La Tabla 3.5 muestra los valores de los módulos de reacción de la subrasante-subbase ( $k_{combinado}$ ) considerados en los diseños, y que han sido obtenidos a partir de los valores del CBR de la subrasante natural, módulo de reacción de la subrasante natural y espesor de la capa de subbase a colocarse.

Tabla 3.5 Módulos de Reacción Combinados de Subrasante-Subbase considerados en los diseños

CBR Subrasante Natural (%)	$k_{SUBRASANTE NATURAL}$ (Mpa/m)	Espesor de Subbase (cm)	$k_{COMBINADO SUBRASANTE-SUBBASE}$ (Mpa/m)
< 2.1	< 19.37	30	33.00
2.1 a 3.3	19.37 a 29.62	25	41.00
3.3 a 5.0	29.62 a 39.04	20	48.00
> 5.0	> 39.04	15	58.00

En la Figura 3.10 se indica el porcentaje de vías clasificadas de acuerdo al valor del módulo de reacción de la subrasante-subbase ( $k_{combinado}$ ) determinado con el método de la PCA. El valor mínimo considerado en los diseños para el  $k_{combinado}$  es de 30 MPa/m y un máximo de 60 MPa/m. El valor promedio es de 42.5 MPa/m con un espesor promedio de subbase de 22.5 cm.

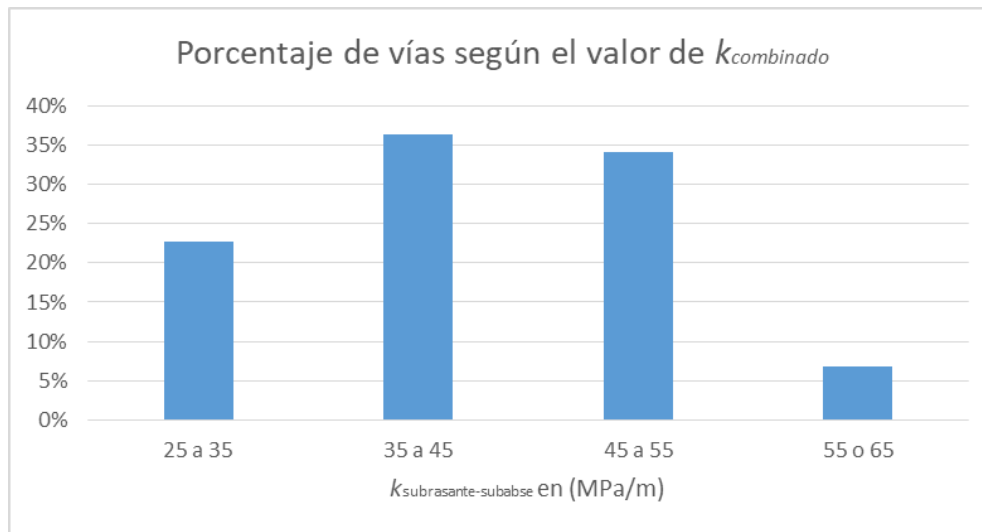


Figura 3.10 Valores del módulo de reacción de la subrasante-subbase ( $k_{\text{combinado}}$ ) considerados en los diseños de vías

En la modelación se considerarán valores del  $k_{\text{combinado}}$  de 30, 40, 50 y 60 MPa/m.

### 3.2.3 Losa de concreto.

La resistencia a flexión en el concreto ha sido considerada como uno de los principales factores de diseño de pavimentos rígidos y se define por el Módulo de Rotura ( $Sc$ ), que puede ser determinado mediante ensayos en vigas simples (ensayo ASTM C78) o mediante fórmulas de correlación.

En las vías analizadas, el Módulo de Rotura ( $Sc$ ) y el Módulo Elástico del concreto ( $Ec$ ) se determina por correlación con la resistencia a la compresión simple en probetas a los 28 días ( $f'_c$ ) a través de las siguientes fórmulas:

$$Sc = 0.12 \cdot f'_c \quad Ec. (3.3)$$

$$Ec = 12500 \cdot f'_c^{0.5} \quad Ec. (3.4)$$

Donde:

$Sc$  = Módulo de rotura del concreto en  $\text{kg/cm}^2$



$f'_c$  = Resistencia a la compresión simple del concreto en  $\text{kg/cm}^2$

$E_c$  = Módulo elástico del concreto en  $\text{kg/cm}^2$

En todos los diseños, la resistencia especificada a la compresión simple en probetas a los 28 días ( $f'_c$ ) es de  $300 \text{ kg/cm}^2$ , con lo que se obtiene un valor de  $S_c = 36 \text{ kg/cm}^2$  (3.53 MPa) y  $E_c = 216506 \text{ kg/cm}^2$  (21232 MPa)

Los métodos mecanicistas de diseño de pavimentos rígidos requieren información sobre parámetros adicionales descritos en las secciones 2.3 y 2.4. En la Tabla 3.6 se resume los valores de los parámetros del concreto de cemento portland utilizados en la modelación y análisis de esfuerzos y deformaciones.

*Tabla 3.6. Valores de los parámetros del concreto de cemento portland utilizados en la modelación*

Variable	Descripción	Valor asumido
$f'_c$	Resistencia a la compresión simple en probetas a los 28 días	29.42 MPa; 4267.01 psi; $300 \text{ kg/cm}^2$
$S_c$	Módulo de rotura del concreto o resistencia a la flexotracción	3.53 MPa; 512.04 psi; $36 \text{ kg/cm}^2$
$E_c$	Módulo elástico del concreto	21232 MPa; $3.08 \times 10^6$ psi; $216506 \text{ kg/cm}^2$
$\nu$	Módulo de Poisson del concreto	0.15
$\gamma_c$	Peso unitario del concreto	$23.6 \text{ kN/m}^3$ ; 0.0868 pci; $2406.53 \text{ kg/cm}^3$
$\alpha_t$	Coefficiente de expansión térmica del concreto	$9 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ; $5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{F}$

### 3.3 Cargas de tráfico y medioambientales

El tráfico y sus cargas, los efectos del medio ambiente, los materiales que conforman la estructura del pavimento y los criterios de falla, son las cuatro principales categorías a considerar en el diseño de pavimentos. En cada categoría existen varios factores que influyen en los procesos de diseño, para lograr un adecuado desempeño del pavimento.



Respecto al tráfico y la carga, se deben considerar principalmente las configuraciones y cargas por eje, el número de repeticiones de carga, las áreas de contacto de las llantas y la posición de las cargas.

Los principales factores ambientales a considerar son la temperatura y la precipitación. La temperatura afecta los módulos elásticos de las distintas capas e induce el alabeo de las losas de concreto. Las precipitaciones afectan la cantidad de agua superficial que se infiltra e influye en la calidad de los suelos de cimentación.

### 3.3.1 Tráfico y Cargas

En esta sección se analizan los tipos de vehículos considerados en los diseños, sus respectivas configuraciones y cargas por eje, el número de repeticiones pronosticadas que van a circular durante el periodo de diseño, las áreas de contacto de los neumáticos y las posibles ubicaciones sobre la calzada del pavimento a ser utilizadas durante la modelación.

#### 3.3.1.1 Tipos de vehículos

La Norma Ecuatoriana de Vialidad NEVI-2012 (MTOP, 2013) considera dos clases generales de vehículos: 1) los livianos que incluye a las motocicletas y automóviles, así como, otros vehículos ligeros tipo camionetas y pickups con capacidad de hasta ocho pasajeros y ruedas sencillas en los ejes traseros; y 2) los vehículos pesados, como camiones, buses y combinaciones de camiones (semirremolques y remolques) de más de cuatro toneladas de peso y doble llanta en las ruedas traseras. El MTOP considera los siguientes tipos de vehículos de diseño:

- **Vehículo Liviano (A)**, motocicletas (A1), automóviles (A2).
- **Buses y Busetas (B)**, que sirven para transportar pasajeros en forma masiva.





- **Camiones (C)**, para transporte de carga, que pueden ser de dos ejes (C1), camiones o tracto-camiones de tres ejes (C2) y también de cuatro, cinco o más ejes (C3).
- **Remolques (R)**, con uno o dos ejes verticales de giro y una unidad completamente remolcada, tipo tráiler o tipo Dolly.

La configuración, tipo y espaciamiento de ejes debe ser considerado en el diseño de pavimentos rígidos, puesto que, debido a la rigidez del concreto de cemento portland, la carga se distribuye sobre áreas más amplias que en pavimentos flexibles. Generalmente se consideran las ruedas en ambos lados de un eje, incluso a una distancia de más de 1.8 m (Huang, 2004b).

En la Figura 3.11 se indican las cargas y configuraciones de ejes de los vehículos contemplados en los diseños, determinadas en base a información recopilada en catálogos de vehículos con características similares, y que están disponibles en las casas comerciales.


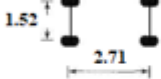



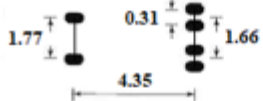

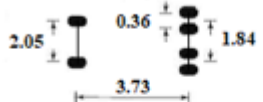



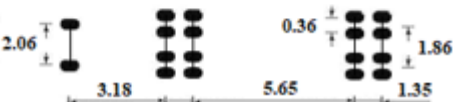
<i>Tipo de Vehículo</i>	<i>Carga por Eje (toneladas)</i>	<i>Configuración de Ejes (m)</i>
Livianos (A)	 1 2.5	 1.52 2.71
Buses (B)	 3.9 9.2	 2.05 5.50 1.88
Camiones (C1)	 3 7	 1.77 4.35 1.66
Camiones (C2)	 7 11	 2.05 3.73 1.84
Camiones (C3)	 7 20	 2.06 3.66 1.86
Tractocamiones (T3S2)	 7 20 20	 2.06 3.18 5.65 1.35

Figura 3.11. Tipos de vehículos considerados en los diseños y configuración de ejes

Para facilitar la modelación, se agruparon los ejes de configuraciones similares, asumiendo valores promedio de las distancias entre neumáticos como se indica en la Figura 3.12, y que serán utilizados para la determinación de esfuerzos y deformaciones en cada tipo de losa.

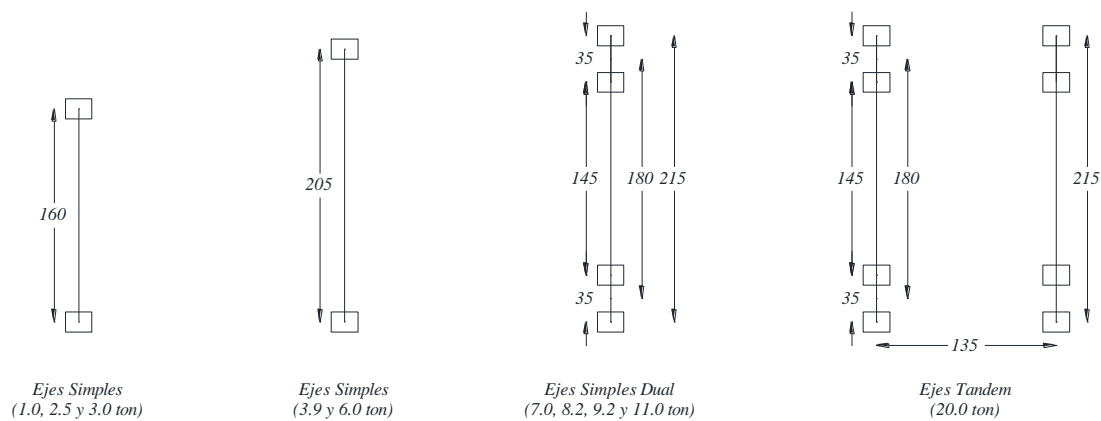


Figura 3.12. Configuración de ejes utilizados en la modelación (distancias en cm)

### 3.3.1.2 Número de repeticiones de carga aplicadas durante el periodo de diseño.

A partir de los estudios y proyecciones de tráfico estipuladas en los diseños, se determinó el número de repeticiones de ejes de carga de los vehículos mostrados en la Figura 3.11, tanto para las vías locales como colectoras. En el caso de las vías arteriales, debido a la falta de información necesaria para determinar la configuración de ejes de los vehículos contemplados en los estudios de tráfico que datan del año 2006, se considerará únicamente el número de repeticiones de carga de un eje equivalente (eje simple dual de 8.2 toneladas). Las siguientes fórmulas se utilizaron en los diseños para determinar el factor de equivalencia:

$$\text{Factor de equivalencia para ejes simples con rueda simple} = (P / 6.6)^4 \quad \text{Ec. (3.5a)}$$

$$\text{Factor de equivalencia para ejes simples con rueda doble} = (P / 8.2)^4 \quad \text{Ec. (3.5b)}$$

$$\text{Factor de equivalencia para ejes tandem} = (P / 13.6)^4 \quad \text{Ec. (3.5c)}$$

$$\text{Factor de equivalencia para ejes tridem} = (P / 18.2)^4 \quad \text{Ec. (3.5d)}$$

Donde:

$P$  = Carga del eje en toneladas



Las Tablas 3.7, 3.8 y 3.9 muestran el número pronosticado de repeticiones de carga sobre el pavimento para un periodo de diseño ( $Y$ ) de 20 años, un factor de distribución por dirección ( $D$ ) igual a 1.00 y un factor de distribución por carril ( $L$ ) de 0.60 para vías arteriales y 0.50 para vías colectoras y locales, respectivamente.

Los valores del TPDA corresponden a estudios de tráfico considerados en los diseños. En el caso de las vías arteriales el TPDA corresponde a estudios realizados en el año 2006, mientras que para vías colectoras y locales corresponden al año 2013 en diferentes intersecciones de la ciudad de Cuenca.

En las tablas también se muestra el número de repeticiones de carga de un eje equivalente de 8.2 toneladas, calculado con un factor camión global, que a su vez ha sido determinado en función de la composición de cada vehículo y el factor de equivalencia del eje de carga respectivo.

Tabla 3.7. Número pronosticado de repeticiones de carga en vías arteriales

Tipo de vehiculo	TPDA <sub>inicial</sub> (Año 2006)	Composición (en %)	Tasa de Crecimiento (en %)	Factor de crecimiento	Número de repeticiones pronosticado en el periodo de diseño
			$r$	$G = 0.5 [1 + (1+r)^Y]$	$Ne = TPDA_{inicial} \cdot G \cdot Y \cdot D \cdot L \cdot 365$
Livianos (A)	5,238	86.69	4.134	1.62	37,261,771
Bus (BM)	44	0.73	3.286	1.45	280,321
Bus (BP)	268	4.44	3.259	1.45	1,701,567
Camiones (C1)	181	3.00	3.248	1.45	1,147,590
Camiones (C2)	268	4.44	3.259	1.45	1,701,567
Camiones (C3)	17	0.28	3.213	1.44	107,308
Tractocamiones (T3S2)	17	0.28	3.213	1.44	107,308
Tractocamiones (T3R2)	9	0.15	3.807	1.56	61,322
<b>Total</b>	<b>6,042</b>	<b>100</b>			<b>42,368,754</b>
				Factor Camión	0.309241
				<b>ESALs</b>	<b>13,102,156</b>

Tabla 3.8. Número pronosticado de repeticiones de carga en vías colectoras



Tipo de vehiculo	TPDA <sub>inicial</sub> (Año 2013)	Composición (en %)	Tasa de Crecimiento (en %)  r	Factor total de crecimiento  $G \cdot Y = (1+r)^Y - 1 / r$	Número de repeticiones pronosticado en el periodo de diseño  $Ne = TPDA_{inicial} \cdot G \cdot Y \cdot D \cdot L \cdot 365$
Livianos (A)	2,082	95.07	0.856	21.71	8,250,201
Buses (B)	38	1.74	2.411	25.32	175,574
Camiones (C1)	29	1.32	2.411	25.32	133,990
Camiones (C2)	31	1.42	2.411	25.32	143,231
Camiones (C3)	7	0.32	2.411	25.32	32,343
Tractocamiones (T3S2)	3	0.14	2.411	25.32	13,861
<b>Total</b>	<b>2,190</b>	<b>100</b>			<b>8,749,200</b>
				Factor Camión <b>ESALs</b>	<b>0.143668</b> <b>1,256,979</b>

Tabla 3.9. Número pronosticado de repeticiones de carga en vías locales

Tipo de vehiculo	TPDA <sub>inicial</sub> (Año 2013)	Composición (en %)	Tasa de Crecimiento (en %)  r	Factor total de crecimiento  $G \cdot Y = (1+r)^Y - 1 / r$	Número de repeticiones pronosticado en el periodo de diseño  $Ne = TPDA_{inicial} \cdot G \cdot Y \cdot D \cdot L \cdot 365$
Livianos (A)	1,409	95.72	0.856	21.71	5,583,349
Buses (B)	29	1.97	2.411	25.32	133,990
Camiones (C1)	11	0.75	2.411	25.32	50,824
Camiones (C2)	5	0.34	2.411	25.32	23,102
Camiones (C3)	13	0.88	2.411	25.32	60,065
Tractocamiones (T3S2)	0	0.00	2.411	25.32	0
<b>Total</b>	<b>1,467</b>	<b>100</b>			<b>5,851,331</b>
				Factor Camión <b>ESALs</b>	<b>0.132092</b> <b>772,915</b>

La Tabla 3.10 y 3.11 muestran el número pronosticado de repeticiones de ejes de carga, que serán comparadas con el número permisible de repeticiones de carga (obtenidas de los modelos de deterioro), de tal forma que permitan calcular el daño generado sobre el pavimento.



Tabla 3.10. Número pronosticado de repeticiones de ejes de carga (por vehículo) aplicadas durante el período de diseño en vías colectoras y locales

Tipo de vehículo	Carga de Eje (Ton)	Tipo de Eje	VIAS COLECTORAS	VIAS LOCALES
			Número pronosticado de repeticiones de carga en el período de diseño	Número pronosticado de repeticiones de carga en el período de diseño
Livianos (A)	1.0	Simple	8,250,201	5,583,349
	2.5	Simple	8,250,201	5,583,349
Buses (B)	3.9	Simple	175,574	133,990
	9.2	Simple Dual	175,574	133,990
Camiones (C1)	3.0	Simple	133,990	50,824
	7.0	Simple Dual	133,990	50,824
Camiones (C2)	6.0	Simple	143,231	46,204
	11.0	Simple Dual	143,231	46,204
Camiones (C3)	6.0	Simple	32,343	60,065
	20.0	Tándem	32,343	60,065
Tractocamiones (T3S2)	6.0	Simple	13,861	0
	20.0	Tándem	13,861	0
	20.0	Tándem	13,861	0

Tabla 3.11. Número pronosticado de repeticiones de ejes de carga aplicadas durante el período de diseño en vías colectoras y locales

Carga de Eje (Ton)	Tipo de Eje	VIAS COLECTORAS	VIAS LOCALES
		Número pronosticado de repeticiones de carga en el período de diseño	Número pronosticado de repeticiones de carga en el período de diseño
1.0	Simple	8,250,201	5,583,349
2.5	Simple	8,250,201	5,583,349
3.0	Simple	133,990	50,824
3.9	Simple	175,574	133,990
6.0	Simple	189,435	106,268
7.0	Simple Dual	133,990	50,824
9.2	Simple Dual	175,574	133,990
11.0	Simple Dual	143,231	46,204
20.0	Tándem	60,065	60,065

### 3.3.1.3 Áreas de contacto de los neumáticos

En los métodos de diseño mecanicistas, es necesario conocer el área de contacto entre el neumático y el pavimento. El tamaño del área de contacto depende de la presión de contacto. Generalmente, se supone que la carga del eje se distribuye uniformemente sobre el área de contacto y que la presión de contacto es igual a la presión del neumático. El área de contacto se puede obtener dividiendo la carga sobre cada neumático para la presión del

neumático. La forma del área de contacto puede considerarse como un círculo de radio  $a$  (Figura 3.13a, empleadas en las fórmulas de Westergaard); como un área formada por dos semicírculos de radio  $0.3 \cdot L$  y un rectángulo de longitud  $0.4 \cdot L$  y ancho  $0.6 \cdot L$  (Figura 3.13b, empleadas en el desarrollo del método de la PCA); o como un rectángulo con una longitud de  $0.8712 \cdot L$  y un ancho de  $0.6 \cdot L$  (Figura 3.13c, empleadas en el desarrollo del método de la PCA 1984) (Huang, 2004b).

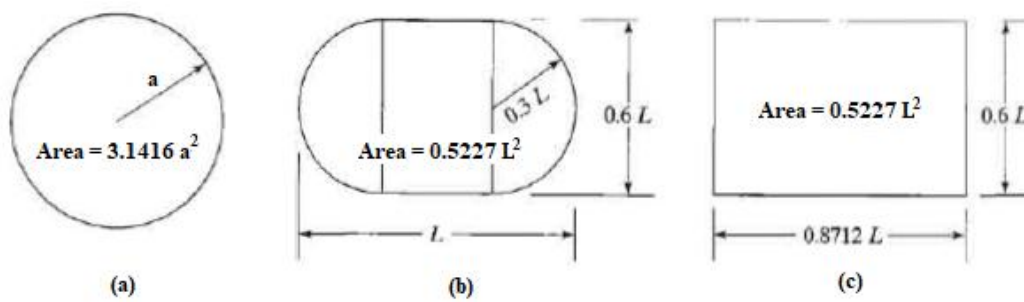


Figura 3.13. Formas del área de contacto entre el neumático y el pavimento (Huang, 2004b)

Las siguientes fórmulas se utilizan para determinar el área de contacto:

$$Ac = P / q \quad \text{Ec. (3.6)}$$

$$a = (Ac / 3.1416)^{0.5} \quad \text{Ec. (3.7)}$$

$$L = (Ac / 0.5227)^{0.5} \quad \text{Ec. (3.8)}$$

Donde:

$Ac$  = Área de contacto entre el neumático y el pavimento

$P$  = Carga sobre un neumático

$q$  = Presión de contacto (igual a la presión de inflado del neumático)

Para un set de neumáticos duales, como el indicado en la Figura 3.14, se recomienda utilizar en las formulas desarrolladas por Westergaard un área circular equivalente, donde el radio  $a_{eq}$  del círculo equivalente se puede calcular con la ecuación Ec. (3.9) (Huang, 2004b).

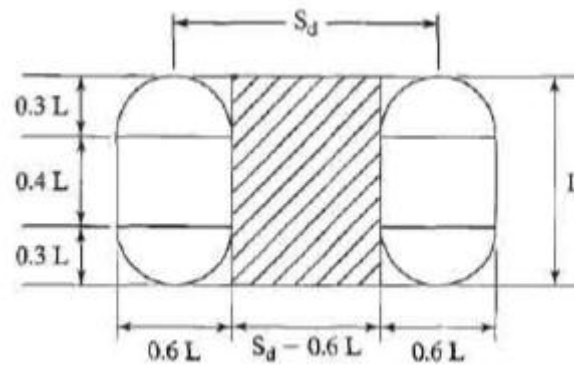


Figura 3.14. Area del círculo equivalente para neumáticos duales (Huang, 2004b)

$$a_{eq} = \sqrt{\frac{0.8521 P_d}{q \pi} + \frac{S_d}{\pi} \left( \frac{P_d}{0.5227 q} \right)^{1/2}} \quad \text{Ec. (3.9)}$$

Donde:

$P_d$  = Carga sobre un neumático de un set de neumáticos duales

$q$  = Presión de contacto (igual a la presión de inflado del neumático)

Tabla 3.12. Cálculo de áreas de contacto de forma rectangular para cada tipo de eje

Carga por Eje (en Ton)	Carga por Eje (en lb)	Tipo de Eje	Nro. De neumáticos por eje	Carga por neumático (lb)	Presión de inflado = Presión de contacto (psi)	Area de contacto (pulg <sup>2</sup> )	L (pulg)	Ancho (cm) 0.6L · 2.54	Largo (cm) 0.8712L · 2.54
1.0	2,200	Simple	2	1,100	35	31.43	7.75	12	17
2.5	5,500	Simple	2	2,750	45	61.11	10.81	16	24
3.0	6,600	Simple	2	3,300	90	36.67	8.38	13	19
3.9	8,580	Simple	2	4,290	90	47.67	9.55	15	21
6.0	13,200	Simple	2	6,600	90	73.33	11.84	18	26
7.0	15,400	Simple Dual	4	3,850	90	42.78	9.05	14	20
8.2	18,000	Simple Dual	4	4,500	110	40.91	8.85	13	20
9.2	20,240	Simple Dual	4	5,060	110	46.00	9.38	14	21
11.0	24,200	Simple Dual	4	6,050	110	55.00	10.26	16	23
20.0	44,000	Tándem	8	5,500	110	50.00	9.78	15	22
<b>Promedio</b>								<b>15</b>	<b>21</b>

Tabla 3.13. Cálculo de áreas de contacto de forma circular para ejes simples duales de 8.2 y 11.0 Ton





Carga por Eje (en Ton)	Carga por Eje (en lb)	Tipo de Eje	Nro. De neumáticos por eje	Carga por neumático (lb)	Presión de inflado = Presión de contacto (psi)	Area de contacto de 2 neumaticos (pulg <sup>2</sup> )	Sd (pulg)	a (pulg) Ec. 3.7	a <sub>eq</sub> (pulg) Ec. 3.9
8.2	18,000	Simple Dual	4.0	4,500	110	81.82	14.00	5.10	7.11
11.0	24,200	Simple Dual	4.0	6,050	110	110.00	14.00	5.92	7.79

En la modelación se considerará un área de contacto de forma rectangular entre el neumático y el pavimento, con un ancho de 150 mm y un largo de 210 mm, igual a los valores promedio calculados en la Tabla 3.12, y sobre la cual se aplicará la carga de cada eje. En las fórmulas de Westergaard, para determinar los esfuerzos producidos por un eje simple dual de 11 toneladas, se utilizará un área de contacto de forma circular de radio equivalente ( $a_{eq}$ ) igual a 19.79 cm (7.79 pulg) como se muestra en la Tabla 3.13, y cuyos resultados serán comparados con los obtenidos en la modelación

#### 3.3.1.4 Ubicación de las cargas

La ubicación de las cargas sobre la calzada influye en el cálculo del daño por fatiga de los pavimentos de concreto simples con juntas. A medida que la ubicación de las cargas se aleja de los bordes, el esfuerzo disminuye significativamente, pero la frecuencia de las aplicaciones de carga aumenta. El MEDPG (AASHTO, 2008) recomienda usar una distribución lateral del tráfico de tipo normal, con una media de 18 pulgadas (45 cm) y una desviación estándar de 10 pulgadas (25 cm) donde no se disponga de información precisa. El método de la PCA considera un factor de reducción ( $f_3$ ) del esfuerzo de borde, según el porcentaje de vehículos que circulen por el borde de la losa, como se indica en la Figura 3.15 (Huang, 2004b).

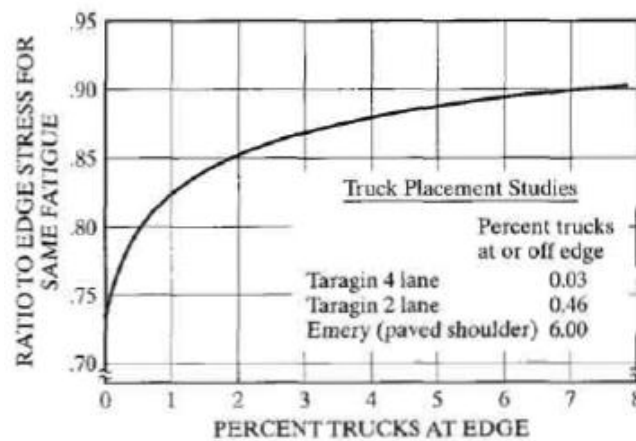


Figura 3.15. Factor  $f_3$  para el cálculo del esfuerzo equivalente (Packard, 1984)

Las condiciones de sitio y características constructivas del pavimento, cómo el uso de espaldones, carriles ensanchados o estructuras de confinamiento lateral (muros, veredas o bordillos), afectan la distancia desde el borde por donde circulan las cargas.

La trayectoria que siguen los vehículos varía con las características de la vía, por lo que en la modelación se estudiará diferentes ubicaciones de la carga sobre la calzada. Se debe tener presente que en vías urbanas existen estructuras de confinamiento lateral, que impiden que los vehículos circulen cerca del borde del pavimento (junto al bordillo).

### 3.3.2 Gradiente térmico en losas de pavimentos rígidos

En el diseño de los pavimentos rígidos, por lo general, se suele considerar solamente los esfuerzos producidos por las cargas. Esta consideración práctica se aplica debido a que los esfuerzos por carga se presentan millones de repeticiones, mientras que los de gradiente térmico una cantidad mucho menor. Adicionalmente, en aquellas carreteras donde el tráfico pesado circula principalmente por la noche, los esfuerzos por gradiente térmico contribuyen en compensar los esfuerzos por carga. Dado que en ciertas zonas del país el gradiente térmico es importante, el diseño debe considerar la acción de ambos esfuerzos. La aplicación de



esfuerzos combinados en el diseño de los pavimentos rígidos con juntas es un tema sobre el cual no hay un enfoque único en las diferentes fuentes bibliográficas. La PCA no considera los esfuerzos de alabeo en el análisis de fatiga, pero otros como Darter y Barenberg sugieren la inclusión de esfuerzos de alabeo con esfuerzos de carga para el análisis de fatiga (Ménendez, H. Mélenz, & E. Monge, 2015).

Debido a la falta de información en la región sobre el gradiente térmico en losas de pavimento rígido, los valores asumidos para la modelación se obtendrán en base a las sugerencias bibliográficas. Según Huang (2004b), es razonable suponer un gradiente de temperatura máximo de 2.5 a 3.5 ° F por pulgada de losa (0.055 a 0.077 ° C / mm) durante el día y aproximadamente la mitad de estos valores por la noche. La Tabla 3.14 muestra los gradientes térmicos promedios, sugeridos por Huang (2004b), en función del espesor de la losa de pavimento. El programa informático ME-CR Rigid 1.0 de la Universidad de Costa Rica incorpora el modelo de la Figura 3.16 como una opción para determinar el gradiente térmico en losas de pavimento rígido (Vargas, 2016).

*Tabla 3.14. Gradientes térmicos promedios sugeridos por Huang para losas de pavimentos rígidos*

<b>Espesor de Losa (mm)</b>	<b>Gradiente Térmico Diurno (0.066 ° C / mm)</b>	<b>Gradiente Térmico Nocturno (0.033 ° C / mm)</b>
160	10.6	5.3
170	11.2	5.6
190	12.5	6.3
200	13.2	6.6
210	13.9	6.9
220	14.5	7.3
Promedio	12.7	6.3

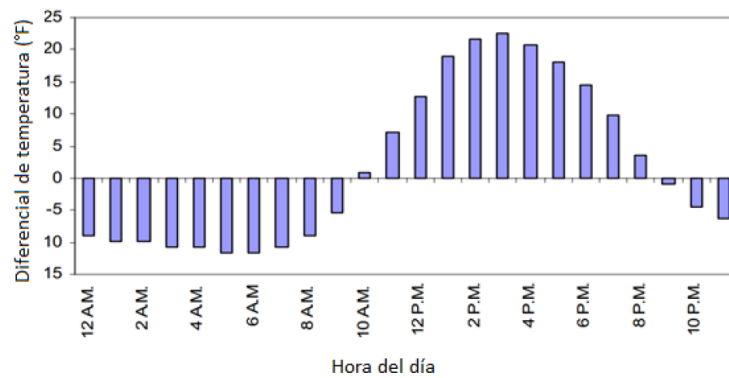


Figura 3.16. Diferencias usuales de temperatura entre la superficie y la base de la losa (Vargas, 2016)

En las vías estudiadas, la mayor cantidad del tráfico circula desde las 6:00 AM hasta las 8:00 PM, por lo que, en la modelación se considerará un gradiente térmico negativo de  $-11^{\circ}\text{F}$  ( $-6.1^{\circ}\text{C}$ ) y un gradiente térmico positivo  $22^{\circ}\text{F}$  ( $12.2^{\circ}\text{C}$ ). El gradiente térmico en este caso está definido como la temperatura en la superficie de la losa menos la temperatura en la base de la losa.

### 3.4 Eficiencia en la transferencia de cargas (LTE)

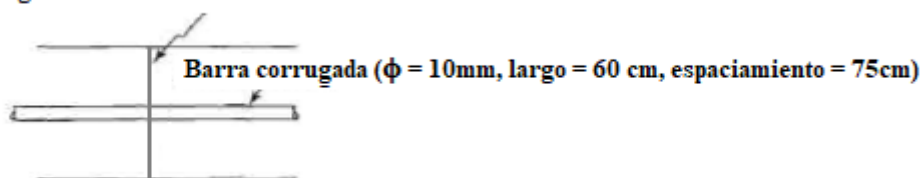
La eficiencia en la transferencia de cargas a través de las juntas y grietas es un parámetro importante que afecta el desempeño de un pavimento rígido. Uno de los equipos comúnmente utilizado, para determinar la eficiencia en la transferencia de cargas, es el deflectómetro de impacto (FWD, falling weight deflectometer). Este tipo de ensayo está fuera del alcance del presente trabajo, razón por la cual se asumirán valores de LTE sugeridos en la bibliografía, en función de las características constructivas de las vías estudiadas y que fueron observadas en campo.



### 3.4.1 Juntas Longitudinales

Las juntas longitudinales se utilizan en la pavimentación de vías para aliviar tensiones de alabeo. En la práctica común, la construcción de la calzada de pavimento rígido se realiza mediante la fundición de un carril a la vez, para lo cual se emplea encofrado metálico y barras de amarre que dan forma a las juntas longitudinales de construcción (denominadas también como junta a tope) como se indica en la Figura 3.17.

**Junta longitudinal formada con encofrado metálico**



*Figura 3.17. Junta longitudinal de construcción típica en vías urbanas de la ciudad de Cuenca*

En el Apéndice KK contemplado en la ME-PDG sobre el agrietamiento transversal en pavimentos con juntas y elaborado por el National Cooperative Highway Research Program (NCHRP, 2003b) se recomienda los valores indicados en la Tabla 3.15 para LTE de juntas longitudinales.

*Tabla 3.15. Eficiencia en la transferencia de carga (LTE) según el tipo de soporte de borde del pavimento*

Tipo de estructura de soporte en el borde del pavimento	LTE
Espaldones de concreto de cemento portland con barras de unión o amarre contruidos monolíticamente	50 - 70 %
Espaldones de concreto de cemento portland con barras de unión o amarre contruidos por separado	30 - 50 %
Espaldones de concreto sin barras de unión o amarre que no proporcionan un soporte significativo	10 %
Losas ensanchadas (los vehículos circulan más cerca de la junta longitudinal de construcción del carril)	70 %

En la modelación se considerarán valores de 0, 10, 30, 50 y 70 para el LTE en juntas longitudinales. Se debe tener en cuenta que las estructuras (muros, veredas o bordillos) colocadas a los lados de la calzada, brindan un adecuado confinamiento, que contribuye en gran medida a evitar la abertura de las juntas longitudinales y favorecen la transferencia de cargas en las juntas de construcción (juntas interiores con barras de amarre). Por otra parte, al ser relativamente lisas las superficies de contacto entre el borde de la losa y las estructuras de confinamiento y sin ningún elemento de unión, la transferencia de cargas en estas áreas podría considerarse menor a la de las juntas longitudinales de construcción.

### 3.4.2 Juntas Transversales

Las juntas transversales de un pavimento pueden ser de contracción (utilizadas para aliviar los esfuerzos de tensión), de dilatación (que se construyen para aliviar esfuerzos de compresión) o de construcción (que se colocan al finalizar una jornada de fundición), como se indican en la Figura 3.18.

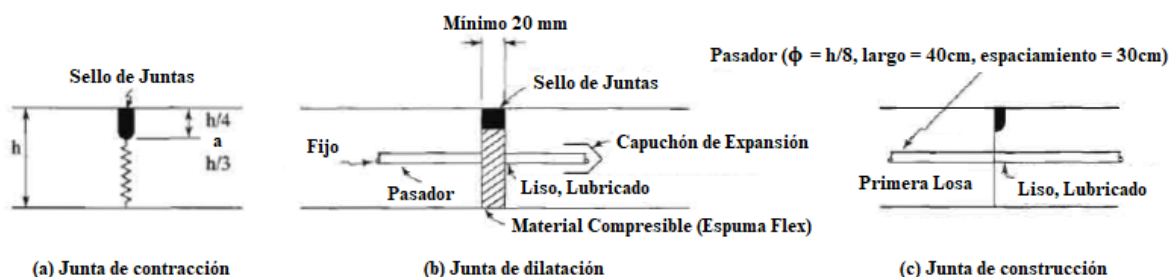


Figura 3.18. Juntas transversales típicas en vías urbanas de la ciudad de Cuenca

En este trabajo se analizarán únicamente las juntas transversales de contracción, que en la práctica común, se forman con una ranura ficticia colocando una tira de metal (pletina) sobre el concreto fresco, que luego se elimina; o mediante aserrado (o corte) una vez que el concreto ha alcanzado una resistencia adecuada. La ranura se sella luego con un material capaz



de resistir la extensión y compresión repetidas, a medida que cambian la temperatura y la humedad en las losas. En la vías colectoras y locales analizadas, la transferencia de carga a través de la junta se logra únicamente mediante la trabazón de agregados (no se utilizan pasadores).

Según el reporte final para la evaluación de la transferencia de cargas en juntas y grietas elaborado por la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA, 2003), el valor de LTE es un parámetro complejo de determinar puesto que depende de muchos factores relacionadas con el clima y características constructivas. El ME-PDG utiliza valores de LTE entre 0 y 90%, para el cálculo de esfuerzos críticos producidos en el fondo de la losa y un valor de LTE del 50%, para el cálculo de esfuerzos críticos en la superficie de la losa, en juntas transversales sin pasadores, y un 85% en juntas con pasadores (NCHRP, 2003b).

En la modelación se considerarán valores de 0, 10, 30, 50 y 70 para el LTE en juntas transversales. Se debe tener en cuenta que ninguna de las vías colectoras y locales estudiadas ha sido diseñada con elementos de transmisión de carga (pasadores) en las juntas transversales; solo se consideran en las vías arteriales.

En la modelación por elementos finitos, el parámetro que controla el porcentaje de transferencia de carga está dado por la rigidez de la junta y puede ser determinada con las siguientes ecuaciones (NCHRP, 2003a):

$$AGG^* = \left( \frac{\frac{1}{LTE} - 0.01}{0.012} \right)^{-1.17786} \quad \text{Ec. (3.10)}$$

$$AGG = AGG^* k \ell \quad \text{Ec. (3.11)}$$



Donde:

$AGG^*$  = Rigidez adimensionales de junta

$AGG$  = Rigidez al corte por unidad de longitud, debido a la trabazón de agregados en la junta

$\ell$  = Radio de rigidez relativa

$k$  = Módulo de reacción de la subrasante.

### 3.5 Sistema de losas y elementos finitos a utilizarse en la modelación

Para el cálculo de los esfuerzos y deformaciones que se producen en los pavimentos rígidos, se modeló un sistema de cuatro losas, como se indica en la Figura 3.19, y donde, además, se muestra la malla que forman los elementos finitos en los que se divide cada losa.

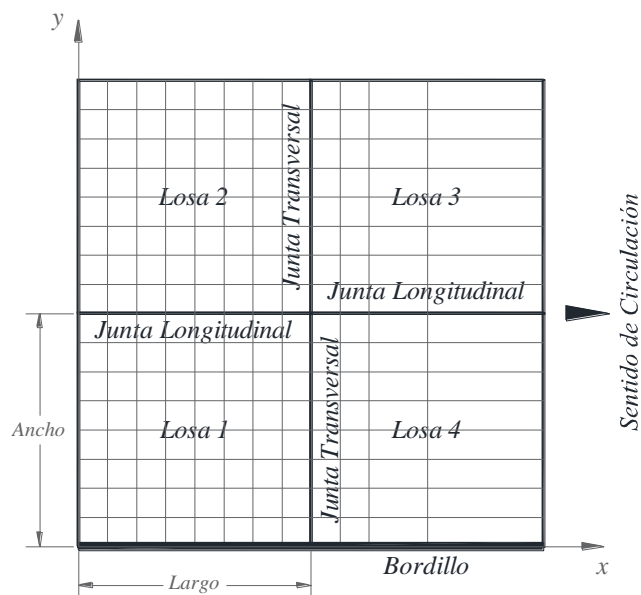


Figura 3.19. Configuración de losas y elementos finitos utilizados en la modelación

Por ser las losas sobre las cuales se colocarán las cargas, en las losas 1 y 2 se utilizó un mallado más fino. Las dimensiones de los elementos finitos para los diferentes tamaños de losas analizadas se muestran en la Tabla 3.16.





*Tabla 3.16. Dimensiones de los elementos utilizados durante la modelación*

Descripción	Losas	Losas	Losas	Losas	Losas
	2x2	2.5x2.25	2.5x3	3x3	3x3.5
Largo de losas (cm)	200	250	250	300	300
Ancho de losas (cm)	200	225	300	300	350
Largo de elemento finito (cm)	25	31	31	38	38
Ancho del elemento finito (cm)	25	28	38	38	44

El tamaño de los elementos finitos utilizados en la modelación está relacionado con las limitaciones del software (KenSlabs), respecto al número de nodos y elementos que éste admite. Vale la pena indicar que los resultados obtenidos con este programa son sensibles al tamaño de los elementos finitos, por lo que, en este trabajo se realizó una comparación entre los esfuerzos y deformaciones obtenidos en la modelación y valores calculados a través de fórmulas cerradas (contempladas en los capítulos anteriores), para cargas de borde, interiores o de esquina, y gradiente térmico en losas. La diferencia promedio entre estos resultados es de un 3.36% y los cálculos se adjuntan como anexos.

#### 4 Cálculo y análisis de resultados obtenidos en la modelación

Los resultados de la modelación serán presentados en este capítulo, junto con un análisis de los valores obtenidos. Para esto se calcularon los esfuerzos y deformaciones, tanto en la mitad de la losa (entre juntas transversales) como en el extremo de la losa (en la junta transversal), para cargas ubicadas a diferentes distancias desde el bordillo de la losa (Figura 4.1).

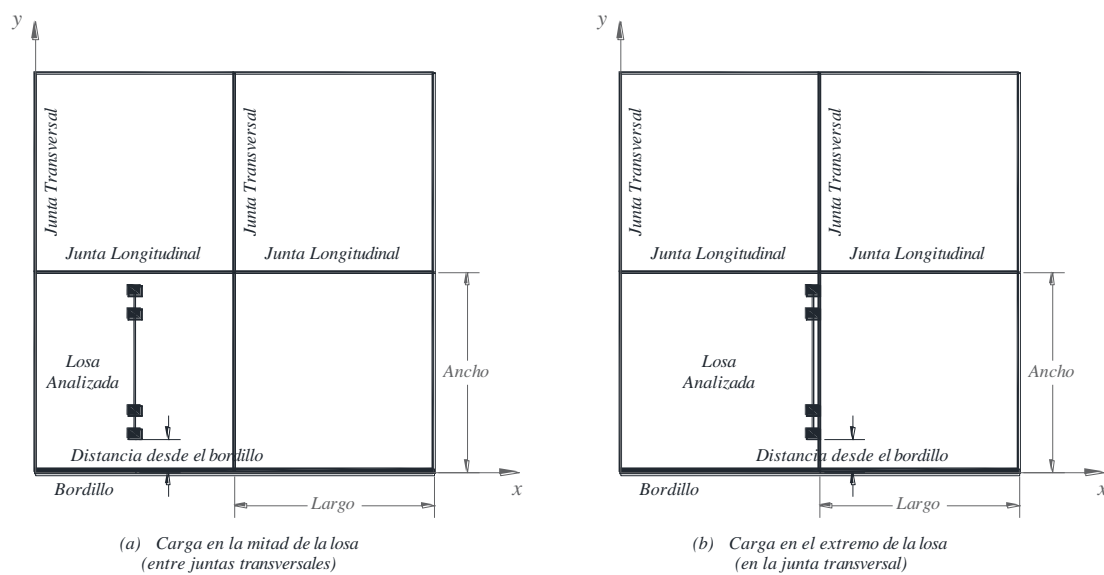


Figura 4.1. Posiciones de carga analizadas

Debido a que los mayores esfuerzos y deformaciones se producen en la mitad y en los extremos de la losa, según los estudios realizados por la PCA, se decidió considerar únicamente estas dos posiciones de las cargas.

En un primer análisis se utilizó un espesor de losa ( $h$ ) de 16.0 cm y un módulo de reacción de la subrasante-subbase ( $k$ ) de 30 MPa/m, por ser los valores mínimos considerados en los diseños. Se estableció un valor medio de LTE del 50% ( $AGG = 26.2$  MPa) tanto para las juntas longitudinales como transversales. Los extremos de la losa junto al bordillo se consideraron como bordes libres ( $LTE = 0$ , despreciando la transferencia de cargas que pudiera existir entre la losa y el bordillo, por ser superficies de contacto lisas sin elementos de



unión). Los esfuerzos con signo positivo representan compresión y con signo negativo tracción, y corresponden a la parte inferior de la losa analizada (superficie en contacto con la capa de subbase). Las deformaciones con signo positivo representan un movimiento hacia abajo y con signo negativo un movimiento hacia arriba, y corresponden a la parte inferior de la losa analizada (superficie en contacto con la capa de subbase). Los valores mostrados a continuación en las tablas y figuras fueron obtenidos de la modelación en KenSlab.

#### 4.1 Esfuerzos en la mitad de las losas (entre juntas transversales)

##### 4.1.1 Esfuerzos en la mitad de las losas por acción de cargas vehiculares

La Tabla 4.1 y Tabla 4.2 presentan un resumen de los esfuerzos máximos que se producen en una losa de pavimento rígido, en los puntos indicados en la Figura 4.2 bajo la acción de la respectiva carga de eje, tanto en la dirección  $x$ - $x$  (longitudinales) como en la dirección  $y$ - $y$  (transversales).

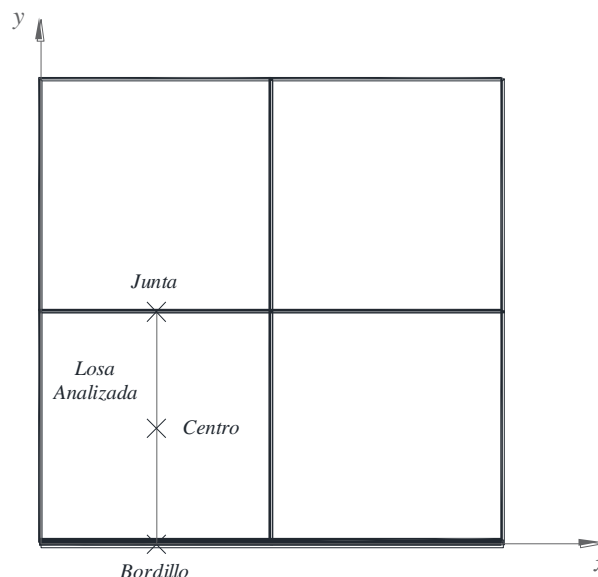


Figura 4.2. Puntos de cálculo de esfuerzos en la mitad de la losa



Tabla 4.1. Esfuerzos máximos (en x-x) que se producen en la mitad de las losas por la acción de cargas

Peso del eje (tn)	Losas 2x2			Losas 2.5x2.25			Losas 3x2.5			Losas 3x3			Losas 3x3.5		
	Bordillo (MPa)	Centro (MPa)	Junta (MPa)	Bordillo (MPa)	Centro (MPa)	Junta (MPa)	Bordillo (MPa)	Centro (MPa)	Junta (MPa)	Bordillo (MPa)	Centro (MPa)	Junta (MPa)	Bordillo (MPa)	Centro (MPa)	Junta (MPa)
1.0	-0.53	-0.23	-0.48	-0.55	-0.26	-0.49	-0.54	-0.24	-0.48	-0.53	-0.24	-0.47	-0.52	-0.25	-0.46
2.5	-1.33	-0.58	-1.20	-1.37	-0.64	-1.23	-1.35	-0.61	-1.19	-1.33	-0.59	-1.17	-1.31	-0.62	-1.15
3.0	-1.59	-0.70	-1.44	-1.65	-0.77	-1.48	-1.62	-0.73	-1.43	-1.60	-0.71	-1.41	-1.57	-0.75	-1.39
3.9	-1.96	-0.89	-1.47	-2.10	-1.02	-1.68	-2.06	-0.93	-1.83	-2.03	-0.91	-1.79	-1.99	-0.90	-1.76
6.0	-3.02	-1.37	-2.26	-3.23	-1.56	-2.59	-3.17	-1.44	-2.81	-3.12	-1.41	-2.76	-3.07	-1.38	-2.71
7.0	-2.52	-1.30	-2.09	-2.71	-1.44	-2.08	-2.71	-1.42	-2.36	-2.64	-1.40	-2.28	-2.60	-1.44	-2.25
8.2	-2.96	-1.52	-2.45	-3.17	-1.69	-2.44	-3.17	-1.67	-2.76	-3.09	-1.64	-2.67	-3.04	-1.69	-2.64
9.2	-3.32	-1.71	-2.75	-3.56	-1.89	-2.73	-3.56	-1.87	-3.10	-3.47	-1.84	-3.00	-3.42	-1.90	-2.96
11.0	-3.96	-2.05	-3.28	-4.25	-2.26	-3.32	-4.26	-2.28	-3.71	-4.15	-2.20	-3.59	-4.08	-2.27	-3.54
20.0	-3.15	-1.65	-2.24	-3.11	-1.54	-2.37	-2.70	-1.44	-2.36	-2.60	-1.45	-2.28	-2.52	-1.47	-2.25

Tabla 4.2. Esfuerzos máximos (en y-y) que se producen en la mitad de las losas por la acción de cargas

Peso del eje (tn)	Losas 2x2			Losas 2.5x2.25			Losas 3x2.5			Losas 3x3			Losas 3x3.5		
	Bordillo (MPa)	Centro (MPa)	Junta (MPa)	Bordillo (MPa)	Centro (MPa)	Junta (MPa)	Bordillo (MPa)	Centro (MPa)	Junta (MPa)	Bordillo (MPa)	Centro (MPa)	Junta (MPa)	Bordillo (MPa)	Centro (MPa)	Junta (MPa)
1.0	0.00	-0.20	0.00	0.00	-0.22	0.00	0.00	-0.20	0.00	0.00	-0.20	0.00	0.00	-0.18	0.00
2.5	0.00	-0.51	0.00	0.00	-0.55	0.00	0.00	-0.51	0.00	0.00	-0.50	0.00	0.00	-0.44	0.00
3.0	0.00	-0.61	0.00	0.00	-0.66	0.00	0.00	-0.61	0.00	0.00	-0.60	0.00	0.00	-0.53	0.00
3.9	0.00	-0.85	0.00	0.00	-0.96	0.00	0.00	-0.83	0.00	0.00	-0.82	0.00	0.00	-0.79	0.00
6.0	0.00	-1.30	0.00	0.00	-1.47	0.00	0.00	-1.28	0.00	0.00	-1.26	0.00	0.00	-1.21	0.00
7.0	0.00	-0.96	0.00	0.00	-0.97	0.00	0.00	-0.92	0.00	0.00	-0.96	0.00	0.00	-0.93	0.00
8.2	0.00	-1.12	0.00	0.00	-1.13	0.00	0.00	-1.08	0.00	0.00	-1.12	0.00	0.00	-1.09	0.00
9.2	0.00	-1.26	0.00	0.00	-1.27	0.00	0.00	-1.21	0.00	0.00	-1.26	0.00	0.00	-1.22	0.00
11.0	0.00	-1.51	0.00	0.00	-1.52	0.00	0.00	-1.54	0.00	0.00	-1.51	0.00	0.00	-1.46	0.00
20.0	0.00	-1.39	0.00	0.00	-1.38	0.00	0.00	-1.51	0.00	0.00	-1.48	0.00	0.00	-1.38	0.00

Del análisis de los resultados mostrados en estas tablas se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Los mayores esfuerzos producidos en el borde de la losa (junto al bordillo), en el centro, y en la junta longitudinal, tanto en la dirección x-x como y-y, son de tracción en el fondo de la losa (todos tienen signo negativo).
- Los mayores esfuerzos son producidos por un eje simple dual de 11.0 toneladas.
- Los esfuerzos de mayor magnitud (-4.26 MPa) se dan en losas de 3x2.5 y se producen en el borde de la losa junto al bordillo, mientras que los menores esfuerzos en ésta ubicación, son producidos por el mismo eje (11.0 ton), y se dan en losas de 2x2 (-3.96 MPa).
- Si se considera las ecuaciones para el deterioro por fatiga de la PCA, los ejes que producen una relación de esfuerzos,  $\sigma/S_c < 0.45$ , no causarían daño por agrietamiento



en los bordes de la losa, puesto que el número de repeticiones permisibles de estos ejes sería ilimitado. Considerando un 6% de vehículos sobre el borde de la losa (con  $f_3 = 0.894$ , obtenido de la Figura 3.15) se tendría  $\sigma = 0.45 S_c / f_3 = 0.45 \times 3.53 / 0.894 = 1.78$  MPa, con lo que ninguno de los ejes de 3.0, 2.5 y 1.0 toneladas deberían considerarse en los análisis por fatiga.

- En el centro de las losas, los mayores esfuerzos son en la dirección x-x, y son producidos por un eje de 11.0 toneladas.

La Figura 4.3 muestra los esfuerzos en la dirección x-x (longitudinales), producidos en la mitad de una losa de 3x3, por un eje simple dual de 11.0 toneladas, ubicado a diferentes distancias desde el bordillo de la losa analizada. A pesar de que los mayores esfuerzos se producen en losas de 3x2.5, se decidió mostrar los resultados obtenidos en losas de 3x3 por ser las geometrías más comunes en los pavimentos de las vías urbanas de la ciudad de Cuenca.

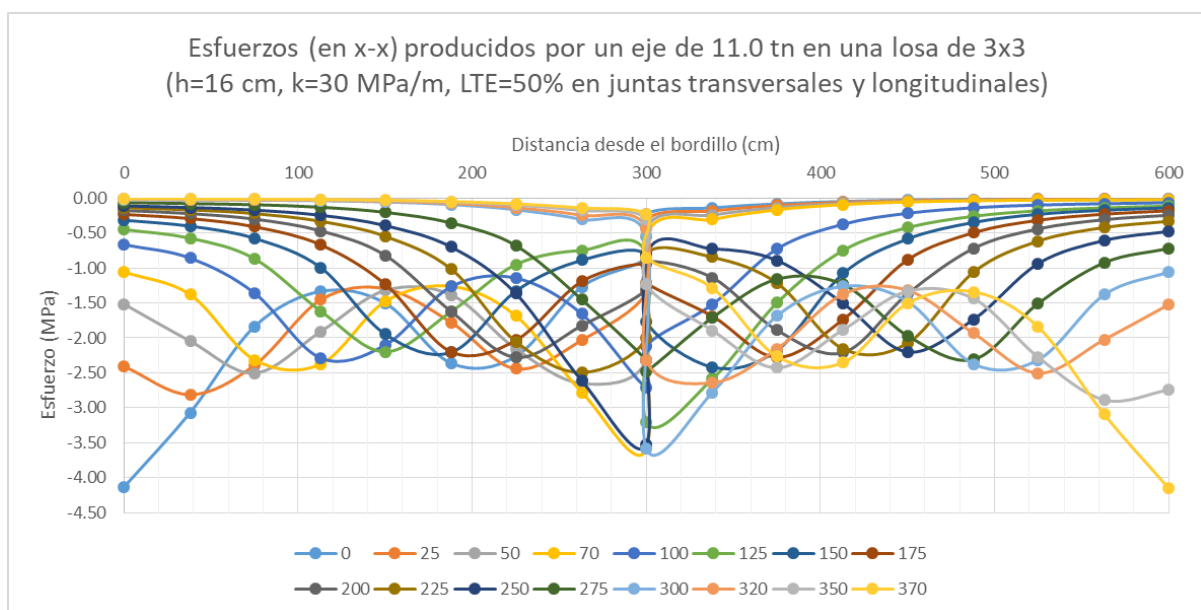


Figura 4.3. Esfuerzos producidos en la dirección x-x (longitudinales) en la mitad de una losa de 3x3 por un eje de 11.0 m.



Del análisis de los resultados mostrados en este gráfico se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Los mayores esfuerzos de tracción en el fondo de la losa se producen para cargas ubicadas a 0 o 370 cm de distancia, desde el bordillo; esto implica un set de ruedas duales sobre el borde del pavimento (junto al bordillo).
- Los mayores esfuerzos de tracción en el fondo de la losa que se producen sobre la junta longitudinal corresponden a cargas ubicadas a 70 o 300 cm de distancia desde el bordillo, esto implica que un set de ruedas duales esta sobre la junta longitudinal.
- A medida que la carga se aleja del bordillo o junta longitudinal, los esfuerzos de borde disminuyen considerablemente. Una carga ubicada a 25 cm del bordillo produce esfuerzos de borde iguales al 58% de los producidos con la carga a 0 cm del bordillo ( $2.41 / 4.15$ ).
- Para cargas ubicadas a 50 cm desde el bordillo, los esfuerzos de borde no superan el 45% del módulo de rotura (1.59 MPa), por lo que, no causarían daño por fatiga o agrietamiento transversal, aplicando el criterio de la PCA. Se comprobó también que para una losa de 17.0 cm, las cargas ubicadas a más de 40 cm del bordillo, tampoco causarían daño por fatiga sobre el borde del pavimento. En losas de 20 cm esta distancia se reduce a 30 cm. Todo esto considerando que la transferencia de carga entre el bordillo y la losa de pavimento es nula.
- En la gráfica se puede observar que no existen esfuerzos de tracción en la superficie de la losa para ninguna de las posiciones del eje. Esto ocurre para todos los ejes simples, no así para los ejes tándem, cuyos dos ejes sobre una misma losa producen esfuerzos de tracción longitudinal (en x-x) en la superficie; se comprobó que estos



esfuerzos en la mitad la losa alcanzan un valor máximo (1.81 MPa), en losas de 2x2, donde cada uno de los ejes del tándem está más cerca de las juntas transversales (carga ubicada a 150 cm del bordillo, y con los sets de ruedas duales sobre la junta longitudinal).

La Figura 4.4 es idéntica a la Figura 4.3, pero se muestran únicamente los esfuerzos producidos por la carga ubicada en el borde de la losa (a 0 cm del bordillo), en el centro de la losa (a 125 cm del bordillo), y sobre la junta longitudinal (a 70 cm de bordillo).

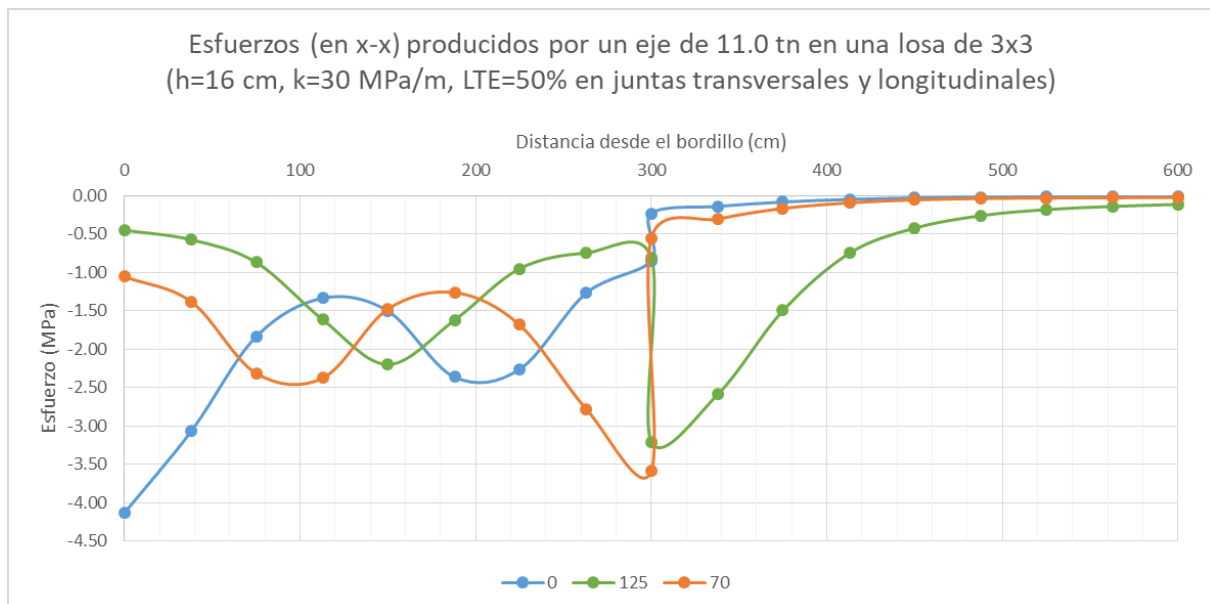


Figura 4.4. Esfuerzos producidos en la dirección x-x (longitudinales) en la mitad de una losa de 3x3 por un eje de 11.0 tn ubicado en el borde, centro y junta longitudinal.

Del análisis de los resultados mostrados en este gráfico se pueden hacer las siguientes observaciones:

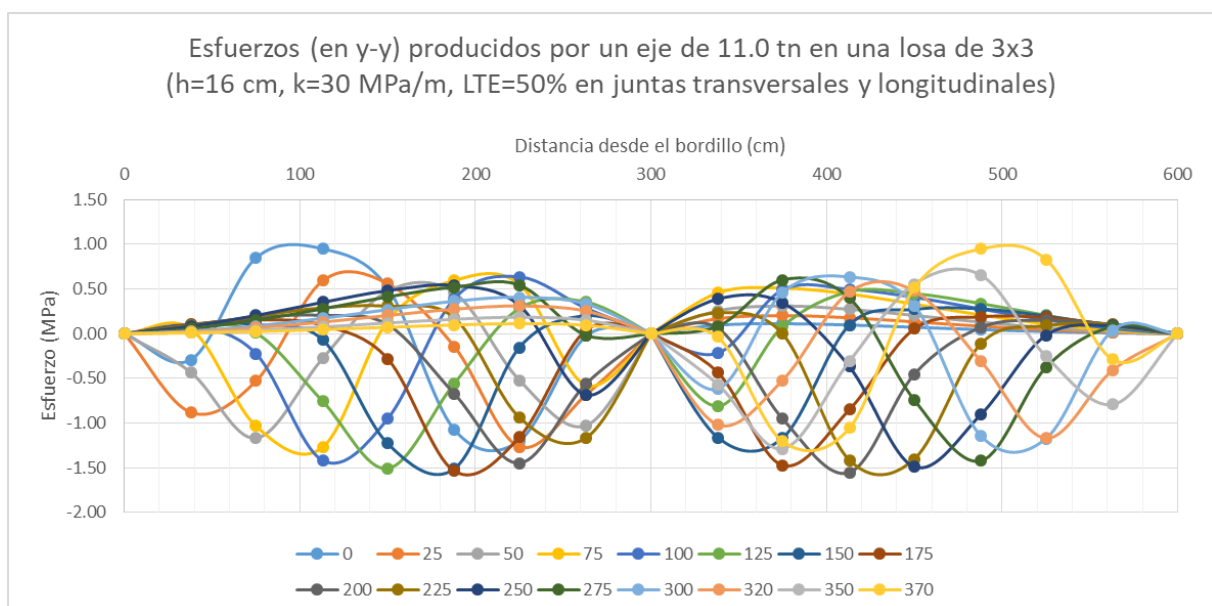
- En esta figura se puede apreciar básicamente el efecto de la transferencia de carga en la junta longitudinal sobre los esfuerzos. En el borde de la losa, donde no hay



transferencia de carga, el esfuerzo alcanza un valor de 4.15 MPa, mientras en el lado cargado de la junta longitudinal con una eficiencia en la transferencia de carga del 50%, el esfuerzo es de 3.59 MPa, logrando una disminución del esfuerzo del 13.5% (0.56 MPa).

- Si se considera la carga ubicada sobre la junta longitudinal (a 70 cm del bordillo), se puede observar que el esfuerzo en la losa cargada es de 3.59 MPa, mientras que, en la losa no cargada es 0.56 MPa, lo que significa que la disminución del esfuerzo indicada en el párrafo anterior es transferida a la losa no cargada a través de la junta longitudinal; esto deja ver la importancia de la eficiencia en la transferencia de cargas en juntas para la reducción de esfuerzos.
- Los esfuerzos en el centro de la losa (2.20 MPa) representan apenas el 53.0%, del esfuerzo de borde (4.15 MPa).

La Figura 4.5 muestra los esfuerzos en la dirección y-y (transversales) producidos en la mitad de una losa de 3x3 por un eje simple dual de 11.0 toneladas, ubicado a diferentes distancias desde el bordillo de la losa analizada (cada 25 cm).







*Figura 4.5. Esfuerzos producidos en la dirección y-y (transversales) en la mitad de una losa de 3x3 por un eje de 11.0 tn.*

Del análisis de los resultados mostrados en este gráfico se pueden hacer las siguientes observaciones:

- A diferencia de los esfuerzo producidos en la dirección  $x-x$ , en la dirección  $y-y$  sí se producen esfuerzos de tracción en la superficie de la losa. Los de mayor magnitud son causados por ejes ubicados en el borde del pavimento (a 0 ó 370 cm desde el bordillo). Se comprobó que los máximos esfuerzos de este tipo (2.03 MPa) son producidos en el centro de una losa de 2x2 por un eje tándem, donde, cada uno de los ejes está más cerca de las juntas transversales (carga ubicada a 0 o 370 cm del bordillo, y los sets de ruedas duales están junto al bordillo).
- Ninguno de los esfuerzos de tracción en el fondo de la losa, en la dirección  $y-y$ , supera el valor de 1.59 MPa.

#### 4.1.2 Esfuerzos en la mitad de las losas por acción del gradiente térmico

La Tabla 4.3 y Tabla 4.4 presentan un resumen de los esfuerzos máximos (tanto en la dirección  $x-x$ , longitudinales; como en la dirección  $y-y$ , transversales), producidos en la mitad de las losas (entre juntas transversales) por un gradiente térmico negativo de  $-6.1^{\circ}\text{C}$  (superficie de la losa más fría que el fondo, alabeo hacia arriba) y un gradiente térmico positivo de  $12.2^{\circ}\text{C}$  (superficie de la losa más caliente que el fondo, alabeo hacia abajo).

*Tabla 4.3. Esfuerzos máximos (en  $x-x$ ) que se producen en la mitad de las losas debido al gradiente térmico*

Gradiente térmico ( $^{\circ}\text{C}$ )	Losas 2x2			Losas 2.5x2.25			Losas 3x2.5			Losas 3x3			Losas 3x3.5		
	Bordillo (MPa)	Centro (MPa)	Junta (MPa)	Bordillo (MPa)	Centro (MPa)	Junta (MPa)	Bordillo (MPa)	Centro (MPa)	Junta (MPa)	Bordillo (MPa)	Centro (MPa)	Junta (MPa)	Bordillo (MPa)	Centro (MPa)	Junta (MPa)
-6.1	0.09	0.10	0.09	0.19	0.21	0.19	0.32	0.34	0.32	0.32	0.36	0.32	0.31	0.38	0.31
12.2	-0.18	-0.20	-0.18	-0.38	-0.41	-0.38	-0.64	-0.69	-0.64	-0.63	-0.72	-0.63	-0.62	-0.76	-0.62



Tabla 4.4. Esfuerzos máximos (en y-y) que se producen en la mitad de las losas debido al gradiente térmico

Gradiente térmico (°C)	Losas 2x2			Losas 2.5x2.25			Losas 3x2.5			Losas 3x3			Losas 3x3.5		
	Bordillo (MPa)	Centro (MPa)	Junta (MPa)	Bordillo (MPa)	Centro (MPa)	Junta (MPa)	Bordillo (MPa)	Centro (MPa)	Junta (MPa)	Bordillo (MPa)	Centro (MPa)	Junta (MPa)	Bordillo (MPa)	Centro (MPa)	Junta (MPa)
-6.1	0.00	0.10	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.22	0.00	0.00	0.36	0.00	0.00	0.50	0.00
12.2	0.00	-0.20	0.00	0.00	-0.31	0.00	0.00	-0.45	0.00	0.00	-0.73	0.00	0.00	-1.01	0.00

Del análisis de los resultados mostrados en estas tablas se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Los mayores esfuerzos por gradiente térmico, tanto en la dirección  $x-x$  como  $y-y$ , se producen en el centro de la losa.
- Los mayores esfuerzos por gradiente térmico se producen en losas de 3x3.5 y los menores esfuerzos en losas de 2x2.
- Un gradiente térmico negativo (superficie más fría que el fondo) produce esfuerzos de tracción en la superficie de la losa, mientras que un gradiente térmico positivo (superficie más caliente que el fondo) produce esfuerzos de tracción en el fondo de la losa. Estos últimos contribuirían a aumentar los esfuerzos máximos (de borde) capaces de producir el agrietamiento transversal en la mitad de la losa.
- Los esfuerzos máximos de tracción en el fondo de la losa en los bordes del pavimento por el gradiente térmico, son mayores en aproximadamente un 350% en una losa de 3.00 m de largo (-0.63 MPa) a los producidos en una losa de 2.00 m de largo (-0.18 MPa).

Los siguientes gráficos muestran los esfuerzos producidos por el gradiente térmico en una losa de 3x3.

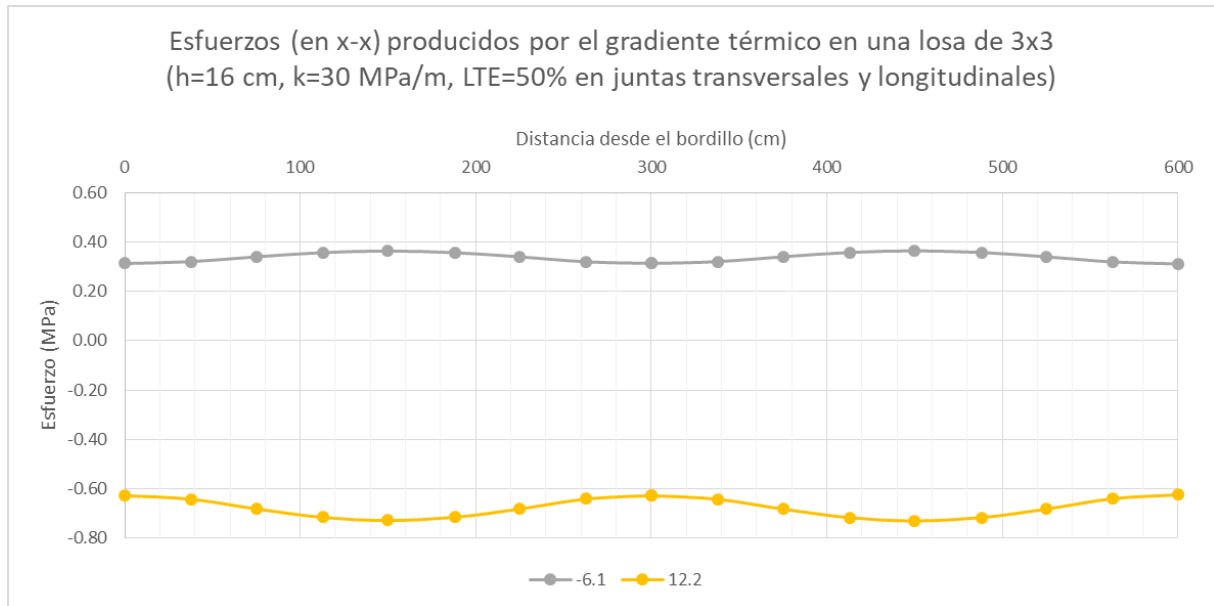


Figura 4.6. Esfuerzos producidos en la dirección x-x (longitudinales) en la mitad de una losa de 3x3 por el gradiente térmico.

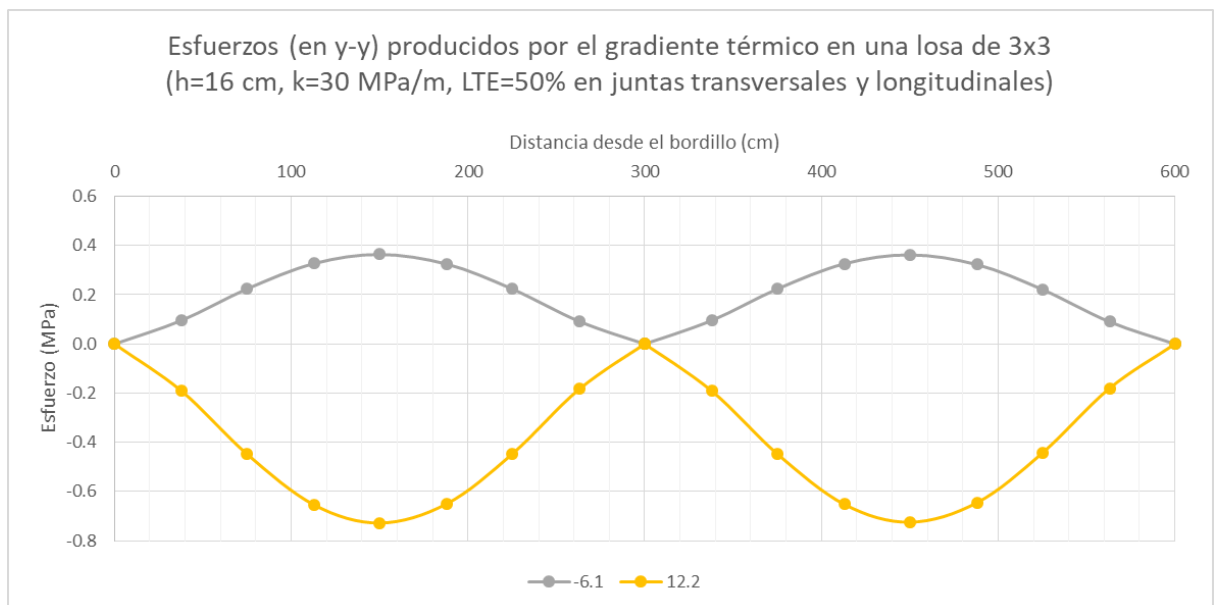


Figura 4.7. Esfuerzos producidos en la dirección y-y (transversales) en la mitad de una losa de 3x3 por el gradiente térmico.

Del análisis de los resultados mostrados en estos gráficos se pueden hacer las siguientes observaciones:



- Los esfuerzos por gradiente térmico que se producen en la mitad de la losa en el sentido  $x-x$  no varían significativamente entre los bordes y el centro, no así en la dirección  $y-y$ , donde los esfuerzos de borde son cero. Se puede decir entonces que en una junta no se producen esfuerzos perpendiculares a esta, ni por gradiente térmico ni por cargas vehiculares.
- Se comprobó que los esfuerzos por gradiente térmico disminuyen al aumentar el espesor de las losas (los esfuerzos en la mitad de la losa para un gradiente térmico de  $12.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  son  $-0.73\text{ MPa}$  en una losa de  $16.0\text{ cm}$  y  $-0.65\text{ MPa}$  en una de  $17.0\text{ cm}$  de espesor). Lo contrario ocurre con el módulo de reacción de la subrasante, los esfuerzos por gradiente térmico aumentan al incrementar el valor de  $k$  (los esfuerzos en la mitad de la losa para un gradiente térmico de  $12.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  son  $-0.73\text{ MPa}$  en un pavimento con un  $k$  de  $30\text{ MPa/m}$  y  $-0.86\text{ MPa}$  para un  $k$  de  $40\text{ MPa/m}$ ).
- Métodos como el de la PCA, no consideran en el diseño de pavimentos los esfuerzos o deformaciones combinados por cargas y gradiente térmico; pero, otros autores como Darter y Barenberg, sugieren considerarlos en el diseño de pavimentos “cero mantenimiento” (Huang, 2004b). Para combinar los esfuerzos o deformaciones, se deben sumar los que se producen en un mismo punto por cargas y gradiente térmico; sin embargo, para los análisis de daño se debería determinar el número de vehículos que circulan durante el período que se produce este gradiente térmico, lo cual, dificulta los cálculos y solo podría realizarse con software apropiado, simplificaciones que faciliten los procesos, e información pertinente sobre los datos de entrada requeridos (como distribución horaria y mensual del tráfico, variaciones de gradiente térmico en losas con el clima y frecuencias con las que ocurren, etc.) y que están fuera del alcance de este trabajo.



## 4.2 Esfuerzos en los extremos de la losas (en las juntas transversales)

### 4.2.1 Esfuerzos en los extremos de las losas por acción de cargas vehiculares

La Tabla 4.5 presenta un resumen de los esfuerzos máximos en la dirección  $y-y$  (transversales) que se producen en una losa de pavimento rígido en los puntos indicados en la Figura 4.8, bajo la acción de la respectiva carga de eje. En los extremos de la losa (en la junta transversal) los esfuerzos en la dirección  $x-x$  son nulos.

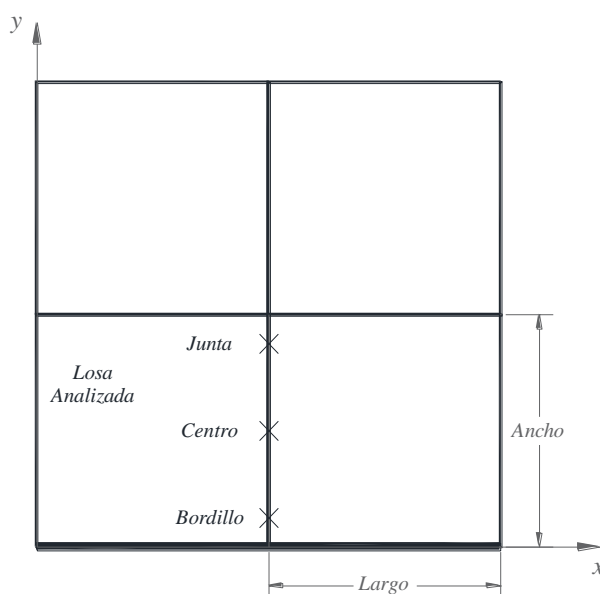


Figura 4.8 Puntos de cálculo de esfuerzos en los extremos de la losa analizada (en la junta transversal)

Tabla 4.5. Esfuerzos máximos (en  $y-y$ ) que se producen en los extremos de las losas por acción de cargas

Peso del eje (tn)	Losas 2x2			Losas 2.5x2.25			Losas 3x2.5			Losas 3x3			Losas 3x3.5		
	Bordillo (MPa)	Centro (MPa)	Junta (MPa)	Bordillo (MPa)	Centro (MPa)	Junta (MPa)	Bordillo (MPa)	Centro (MPa)	Junta (MPa)	Bordillo (MPa)	Centro (MPa)	Junta (MPa)	Bordillo (MPa)	Centro (MPa)	Junta (MPa)
1.0	0.32	-0.42	0.28	0.29	-0.42	0.24	0.29	-0.41	0.22	0.28	-0.40	0.21	0.27	-0.35	0.20
2.5	0.80	-1.05	0.70	0.72	-1.05	0.60	0.72	-1.03	0.56	0.71	-1.00	0.54	0.67	-0.87	0.51
3.0	0.96	-1.26	0.84	0.87	-1.25	0.72	0.87	-1.24	0.67	0.85	-1.20	0.64	0.81	-1.04	0.61
3.9	1.09	-1.70	0.63	1.27	-1.69	1.23	1.16	-1.67	1.01	1.13	-1.62	0.89	1.10	-1.56	0.86
6.0	1.68	-2.32	0.97	1.96	-2.32	1.03	1.79	-2.58	1.55	1.74	-2.50	1.36	1.70	-2.40	1.32
7.0	1.64	-1.40	0.68	1.67	-1.53	0.72	1.54	-1.60	1.39	1.43	-1.69	1.16	1.46	-1.59	1.08
8.2	1.93	-1.64	0.79	1.96	-1.80	0.84	1.81	-1.87	1.63	1.68	-1.98	1.36	1.71	-1.87	1.26
9.2	2.16	-1.84	0.89	2.20	-2.02	0.95	2.03	-2.10	1.83	1.88	-2.22	1.52	1.92	-2.09	1.42
11.0	2.58	-2.39	1.06	2.63	-2.41	1.13	2.42	-2.60	2.18	2.25	-2.56	1.82	2.29	-2.50	1.69
20.0	2.91	-2.24	0.90	2.87	-2.37	1.09	2.63	-2.53	2.17	2.39	-2.45	1.78	2.50	-2.39	1.69

Del análisis de los resultados mostrados en esta tabla se pueden hacer las siguientes observaciones:



- Los mayores esfuerzos son de tracción en la superficie de la losa y son producidos por un eje tándem de 20.0 toneladas, ubicado junto al bordillo. El mayor de estos esfuerzos se produce en losas de 2x2 (2.91 MPa)
- Para cargas ubicadas en el centro de la losa o sobre la junta longitudinal de construcción, los mayores esfuerzos son producidos por un eje simple dual de 11.0 toneladas. En el centro se producen esfuerzos de tracción en el fondo de la losa, mientras que para cargas sobre la junta longitudinal los esfuerzos son de tracción en la superficie de la losa.
- Los esfuerzos producidos en el centro de la losa por un eje simple de 6.0 toneladas son menores, en apenas un 3% en promedio, a los producidos por un eje simple dual de 11.0 toneladas.

La Figura 4.9 muestra los esfuerzos producidos por un eje de 11.0 ton en el extremo de una losa de 3x3 ubicada a diferentes distancias desde el bordillo de la losa analizada.

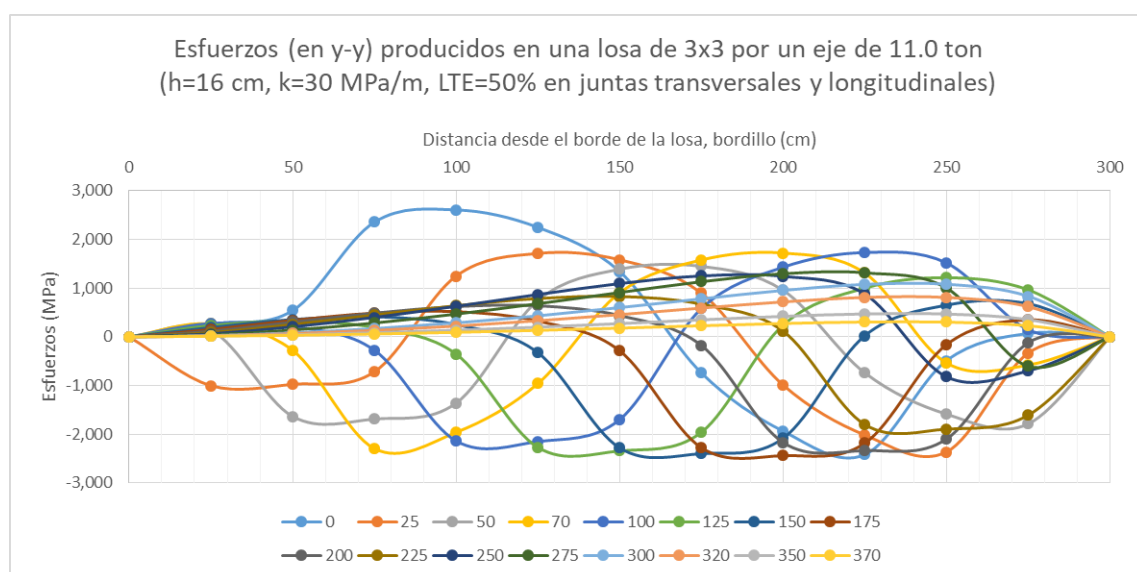


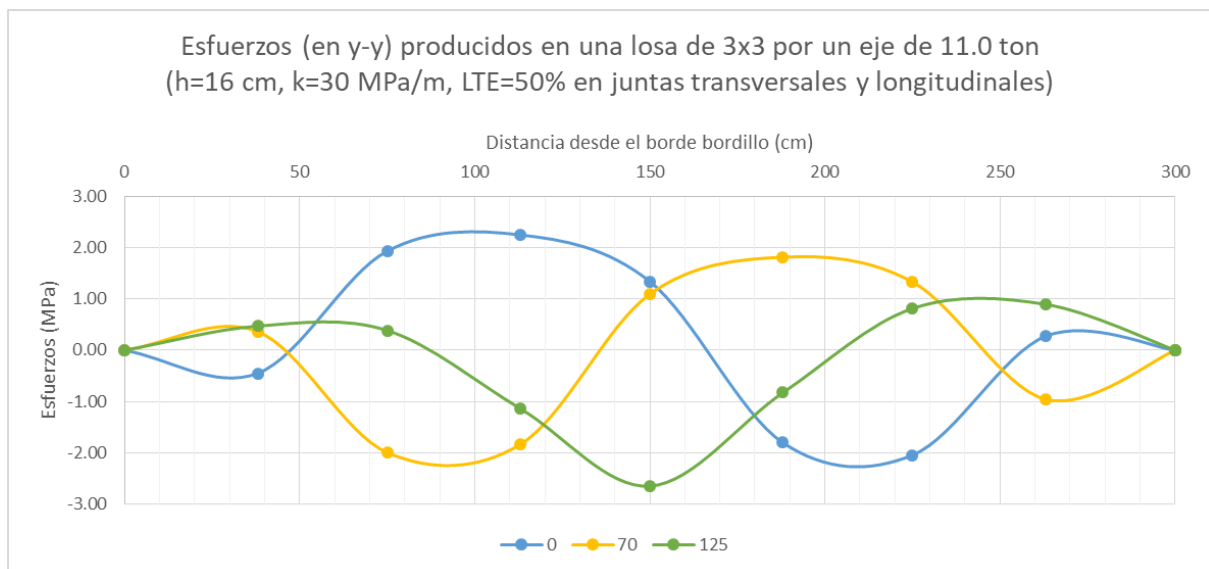
Figura 4.9. Esfuerzos producidos en la dirección y-y (transversales) por un eje de 11.0 ton en el extremo de una losa de 3x3



Del análisis de los resultados mostrados en este gráfico se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Los mayores esfuerzos en la superficie de la losa (2.25 MPa) se producen por una carga ubicada en la esquina de la losa (bordillo-junta transversal).
  - Los mayores esfuerzos en el fondo de la losa (-2.65 MPa) se producen en el centro por una carga ubicada a 125 cm desde el bordillo. Valores cercanos a este máximo también se producen por cargas ubicadas a 100, 150, 175 y 200 cm desde el bordillo.
- A pesar de que estos esfuerzos son menores a los esfuerzos de borde en la mitad de la losa (-4.15 MPa), su probabilidad de ocurrencia es mayor y podrían provocar el agrietamiento longitudinal de las losas.

La Figura 4.10 es idéntica a la Figura 4.9 pero se muestran únicamente los esfuerzos producidos por la carga ubicada en la esquina bordillo-junta transversal de la losa (a 0 cm del bordillo), en el centro de la losa sobre la junta transversal (a 125 cm del bordillo) y en la esquina junta transversal-junta longitudinal de la losa (a 70 cm de bordillo).





*Figura 4.10. Esfuerzos producidos en la dirección y-y por un eje de 11.0 ton. en el extremo de una losa de 3x3 a 0, 70 y 125 cm desde el bordillo.*

Del análisis de los resultados mostrados en este gráfico se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Los mayores esfuerzos en la superficie de la losa (2.25 MPa), producidos por una carga ubicada en la esquina (bordillo-junta transversal), se producen a 112 cm desde el bordillo. Para una carga ubicada en la esquina de la losa (junta longitudinal-junta transversal) los esfuerzos en la superficie de la losa se producen a la misma distancia (112 cm) desde la junta longitudinal, pero son de menor magnitud (1.82 MPa).
- Los esfuerzos que se producen en el centro de la losa (por cargas ubicada sobre la junta transversal a 125 cm desde el bordillo) alcanzan un valor de 2.65 MPa de tracción en el fondo de la losa y representan un 75% del módulo de rotura (3.53 MPa). Además se comprobó que la magnitud de estos esfuerzos se incrementan a 2.99 MPa, si la eficiencia en la transferencia de cargas en la junta transversal disminuye de 50% a un 0%.

#### 4.2.2 Esfuerzos en los extremos de las losas por acción del gradiente térmico

La Tabla 4.6 presentan un resumen de los esfuerzos máximos en la dirección y-y (transversales) producidos en los extremos de la losa (en la junta transversal) para un gradiente térmico de  $-6.1^{\circ}\text{C}$  y  $12.2^{\circ}\text{C}$ . En la dirección x-x los esfuerzos son nulos.

*Tabla 4.6. Esfuerzos máximos (en y-y) que se producen en los extremos de las losas debido al gradiente térmico*

Gradiente térmico ( $^{\circ}\text{C}$ )	Losas 2x2			Losas 2.5x2.25			Losas 3x2.5			Losas 3x3			Losas 3x3.5		
	Bordillo (MPa)	Centro (MPa)	Junta (MPa)	Bordillo (MPa)	Centro (MPa)	Junta (MPa)	Bordillo (MPa)	Centro (MPa)	Junta (MPa)	Bordillo (MPa)	Centro (MPa)	Junta (MPa)	Bordillo (MPa)	Centro (MPa)	Junta (MPa)
-6.1	0.00	0.09	0.00	0.00	0.12	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00	0.32	0.00	0.00	0.46	0.00
12.2	0.00	-0.17	0.00	0.00	-0.25	0.00	0.00	-0.36	0.00	0.00	-0.64	0.00	0.00	-0.92	0.00





La Figura 4.11 muestra los valores de los esfuerzos producidos por el gradiente térmico en una losa de 3x3.

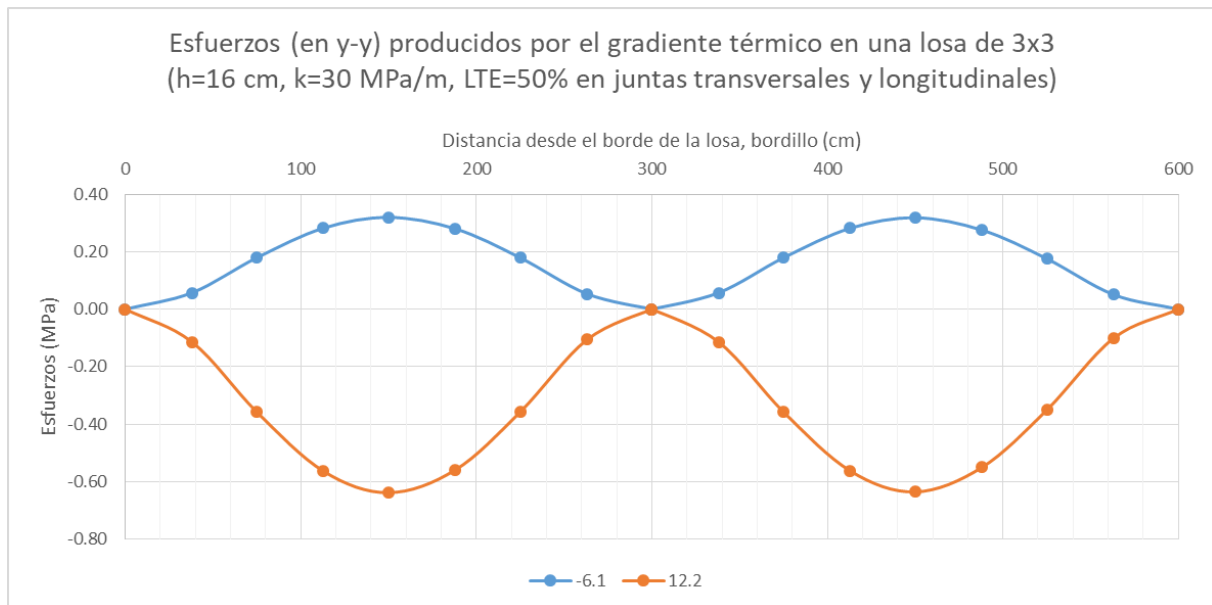


Figura 4.11. Esfuerzos producidos en la dirección y-y (transversales) en el extremo de una losa de 3x3 por el gradiente térmico.

Del análisis de los resultados mostrados en la tabla y gráfico anteriores se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Los mayores esfuerzos transversales (en la dirección y-y) se producen en el centro de la losa, tanto para un gradiente térmico positivo como negativo. En las esquinas de la losa los esfuerzos son nulos.
- En el centro de las losas de 3x3, los esfuerzos producidos por un eje de 11 toneladas, se verían incrementados, en aproximadamente un 25%, por los esfuerzos debido al gradiente térmico positivo.



### 4.3 Deformaciones en la mitad de las losas (entre juntas transversales)

#### 4.3.1 Deformaciones en la mitad de las losas por acción de cargas vehiculares

La Tabla 4.7 presenta un resumen de las deformaciones máximas que se producen en losas de pavimentos rígidos en los puntos indicados en la Figura 4.12, bajo la acción de la respectiva carga de eje.

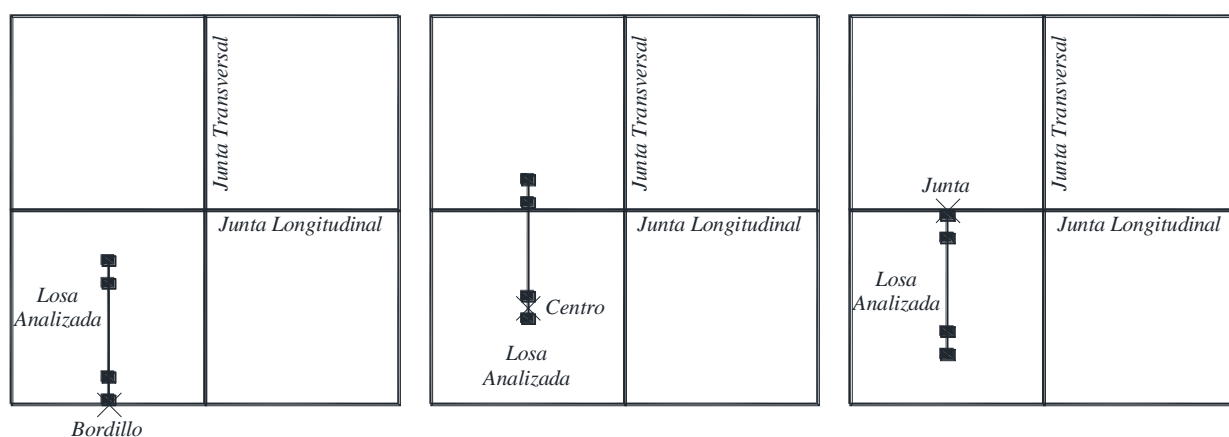


Figura 4.12. Posición de la carga para el cálculo de deformaciones en la mitad de la losa

Tabla 4.7. Deformaciones máximas que se producen en la mitad de las losas bajo la acción de cargas

Peso del eje (tn)	Losas 2x2			Losas 2.5x2.25			Losas 3x2.5			Losas 3x3			Losas 3x3.5		
	Bordillo (mm)	Centro (mm)	Junta (mm)	Bordillo (mm)	Centro (mm)	Junta (mm)	Bordillo (mm)	Centro (mm)	Junta (mm)	Bordillo (mm)	Centro (mm)	Junta (mm)	Bordillo (mm)	Centro (mm)	Junta (mm)
1.0	0.16	0.06	0.10	0.15	0.05	0.10	0.14	0.05	0.10	0.14	0.05	0.10	0.14	0.05	0.10
2.5	0.40	0.15	0.25	0.38	0.13	0.24	0.36	0.13	0.24	0.36	0.12	0.24	0.35	0.13	0.24
3.0	0.48	0.18	0.30	0.45	0.16	0.29	0.43	0.15	0.29	0.43	0.14	0.29	0.42	0.15	0.29
3.9	0.60	0.21	0.38	0.53	0.20	0.33	0.52	0.19	0.34	0.52	0.18	0.35	0.52	0.17	0.35
6.0	0.92	0.33	0.59	0.81	0.30	0.51	0.80	0.29	0.53	0.80	0.28	0.54	0.79	0.26	0.54
7.0	0.86	0.39	0.61	0.79	0.35	0.58	0.78	0.33	0.51	0.79	0.31	0.53	0.78	0.31	0.53
8.2	1.00	0.45	0.72	0.93	0.41	0.68	0.92	0.39	0.60	0.92	0.36	0.62	0.91	0.37	0.62
9.2	1.13	0.51	0.80	1.04	0.46	0.76	1.03	0.43	0.67	1.03	0.41	0.69	1.02	0.41	0.69
11.0	1.35	0.61	0.96	1.25	0.55	0.91	1.23	0.52	0.80	1.24	0.49	0.83	1.22	0.49	0.83
20.0	1.52	0.65	1.00	1.29	0.63	0.93	1.45	0.60	0.87	1.47	0.57	0.92	1.45	0.55	0.92

Del análisis de los resultados mostrados en esta tabla se pueden hacer las siguientes observaciones:



- Las mayores deformaciones en la mitad de la losa (entre juntas transversales) son hacia abajo, y se producen por un eje tándem de 20 toneladas ubicados junto al bordillo. La mayor deformación se da en las losas de 2x2 (1.52 mm).
- Si se analiza las deformaciones producidas por un eje simple dual de 11 toneladas en una losa de 3x3, se puede apreciar que la diferencia entre la deformación en el bordillo (1.24 mm) y la producida en la junta longitudinal (0.83 mm) es de 0.41 mm; esta deformación es tomada por la losa no cargada en la junta longitudinal, con lo que, el valor de la eficiencia en la transferencia de carga sería  $0.41 / 0.83 = 0.493$  o 49.3%, y que es muy cercano al valor del LTE considerado para la junta longitudinal (50%). Esto se ejemplifica en la Figura 4.13 (en este caso se han invertido los valores del *eje* y para mostrar lo que realmente ocurre con la deformación de las losas).

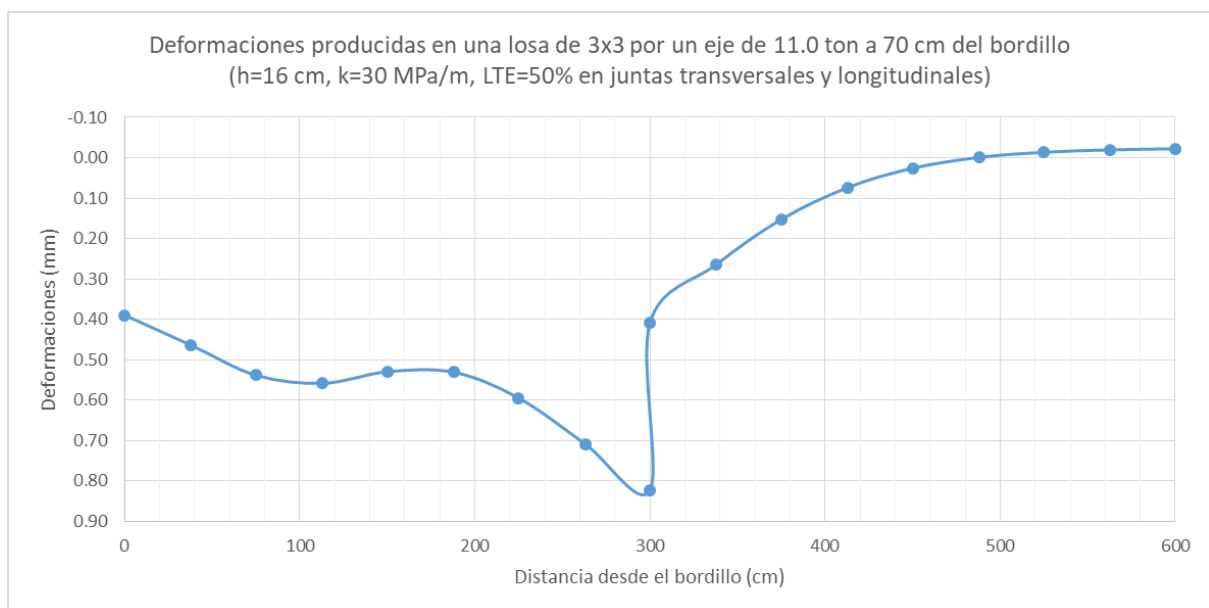


Figura 4.13. Deformaciones producidas en la mitad de la losa para una carga sobre la junta longitudinal



### 4.3.2 Deformaciones en la mitad de las losas por acción del gradiente térmico

La Tabla 4.8 muestra las deformaciones que se producen en la mitad de la losa por acción del gradiente térmico. El signo positivo significa un movimiento hacia abajo (descenso) y el signo negativo representa un movimiento hacia arriba (ascenso).

Tabla 4.8. Deformaciones que se producen en la mitad de las losas por la acción del gradiente térmico

Gradiente térmico (°C)	Losas 2x2			Losas 2.5x2.25			Losas 3x2.5			Losas 3x3			Losas 3x3.5		
	Bordillo (mm)	Centro (mm)	Junta (mm)	Bordillo (mm)	Centro (mm)	Junta (mm)	Bordillo (mm)	Centro (mm)	Junta (mm)	Bordillo (mm)	Centro (mm)	Junta (mm)	Bordillo (mm)	Centro (mm)	Junta (mm)
-6.1	-0.05	0.10	-0.05	-0.05	0.13	-0.05	-0.07	0.14	-0.07	-0.09	0.15	-0.09	-0.09	0.15	-0.09
12.2	0.10	-0.20	0.10	0.11	-0.26	0.11	0.13	-0.29	0.13	0.17	-0.30	0.18	0.19	-0.30	0.19

La Figura 4.14 presenta las deformaciones en varios puntos de la mitad de la losa (entre juntas transversales) por acción del gradiente térmico. En este caso se han invertido los valores del *eje* y para mostrar en la gráfica lo que realmente ocurre con la deformación de las losas.

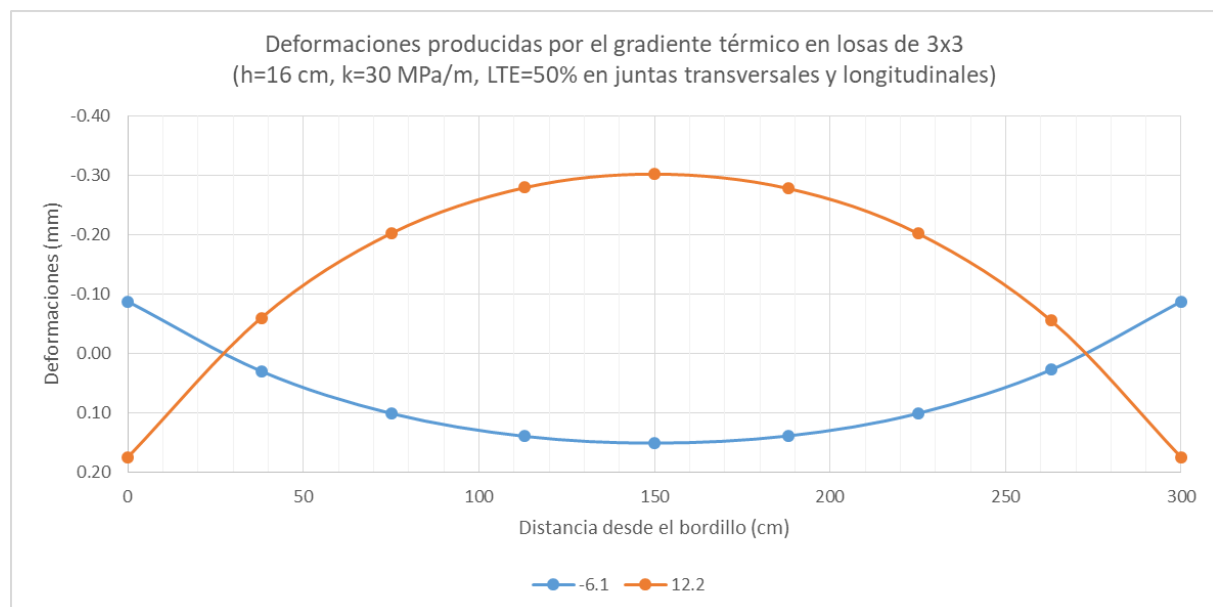


Figura 4.14. Deformaciones por gradiente térmico en la mitad de la losa



Del análisis de los resultados mostrados en este gráfico y la tabla anterior se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Tanto para un gradiente térmico negativo como positivo, las mayores deformaciones ocurren en el centro de las losas.
- Bajo la acción de un gradiente térmico negativo las losas se curvan hacia arriba; esto podría generar que los bordes de la losa pierdan contacto con la cimentación, provocando que las cargas de ejes que circulan por estos puntos incrementen los esfuerzos de tracción que se producen en la superficie de la losa.
- Un gradiente térmico positivo curva las losas hacia abajo; esto podría generar que el centro de la losa pierda contacto con su cimentación, provocando que las cargas de ejes que circulan por estos puntos incrementen los esfuerzos de tracción que se producen en el fondo de la losa.
- Si comparamos el promedio de las deformaciones producidas en la esquina de la losa (bordillo-junta transversal) por un eje tándem de 20 toneladas (1.44 mm), con el promedio de las deformaciones producidas en este mismo punto por la acción de un gradiente térmico de  $12.2^{\circ}\text{C}$  (0.14 mm), las primeras son 10.29 veces más grandes.

#### **4.4 Deformaciones en los extremos de las losas (en las juntas transversales)**

##### **4.4.1 Deformaciones en los extremos de las losas por acción de cargas vehiculares**

La

Tabla 4.9 presenta un resumen de las deformaciones máximas que se producen en las losas de pavimento rígido en los puntos indicados en la Figura 4.15 bajo la acción de la respectiva carga de eje.

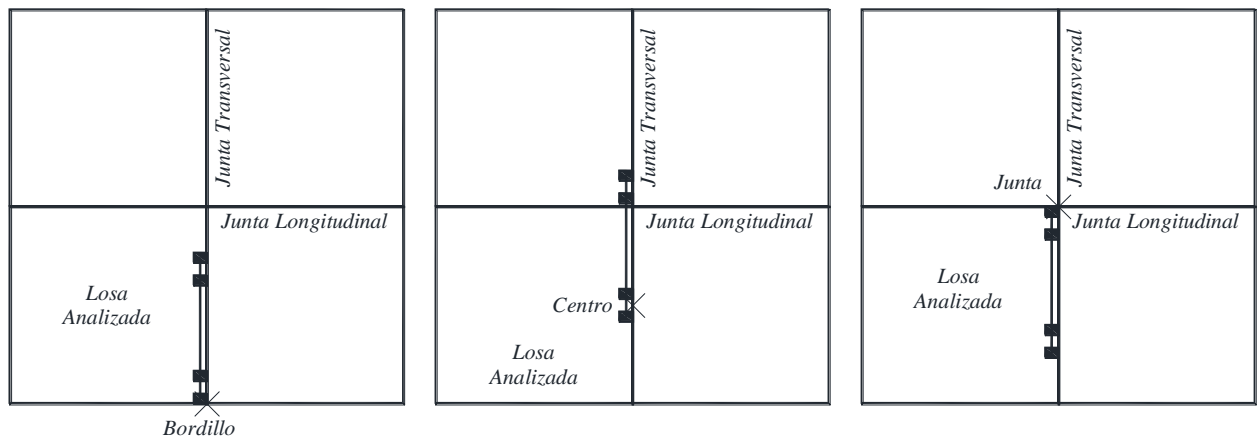


Figura 4.15. Posición de la carga para el cálculo de deformaciones en el extremo de la losa

Tabla 4.9. Deformaciones máximas que se producen en el extremo de las losas bajo la acción de cargas

Peso del eje (tn)	Losas 2x2			Losas 2.5x2.25			Losas 3x2.5			Losas 3x3			Losas 3x3.5		
	Bordillo (mm)	Centro (mm)	Junta (mm)	Bordillo (mm)	Centro (mm)	Junta (mm)	Bordillo (mm)	Centro (mm)	Junta (mm)	Bordillo (mm)	Centro (mm)	Junta (mm)	Bordillo (mm)	Centro (mm)	Junta (mm)
1.0	0.26	0.12	0.19	0.25	0.11	0.18	0.24	0.10	0.18	0.24	0.09	0.17	0.24	0.11	0.17
2.5	0.65	0.30	0.48	0.62	0.27	0.45	0.61	0.25	0.44	0.60	0.23	0.43	0.59	0.28	0.43
3.0	0.78	0.36	0.58	0.75	0.32	0.54	0.73	0.30	0.53	0.72	0.28	0.52	0.71	0.33	0.51
3.9	0.93	0.45	0.69	0.89	0.40	0.64	0.88	0.38	0.64	0.88	0.36	0.64	0.87	0.34	0.63
6.0	1.43	0.70	1.06	1.37	0.62	0.99	1.36	0.58	0.98	1.35	0.55	0.98	1.34	0.53	0.97
7.0	1.44	0.81	1.11	1.37	0.71	1.03	1.36	0.66	0.98	1.35	0.62	0.98	1.33	0.63	0.97
8.2	1.68	0.94	1.30	1.61	0.83	1.20	1.59	0.78	1.14	1.58	0.73	1.14	1.56	0.74	1.13
9.2	1.89	1.06	1.45	1.81	0.94	1.35	1.78	0.87	1.28	1.77	0.81	1.28	1.75	0.83	1.27
11.0	2.26	1.27	1.74	2.16	1.12	1.72	2.13	1.04	1.53	2.12	0.97	1.53	2.09	0.99	1.52
20.0	2.28	1.09	1.66	2.21	1.08	1.66	2.23	1.04	1.49	2.23	0.97	1.52	2.21	0.97	1.51

Del análisis de los resultados mostrados en esta tabla se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Las mayores deformaciones en los extremos de la losa son hacia abajo y son producidas por un eje tándem ubicado en la esquina bordillo-junta transversal. El mayor valor de estas deformaciones se da en losas de 2x2.
- Las mayores deformaciones en los extremos de la losa para cargas ubicadas en el centro de la losa o en la esquina junta longitudinal-junta transversal son producidas por un eje simple dual de 11.0 toneladas. Los mayores valores de estas deformaciones también se producen en losas de 2x2.
- Las deformaciones mostradas en la



- Tabla 4.9 están dadas para una eficiencia en la transferencia de cargas en juntas longitudinales y transversales del 50%. Utilizando la numeración de las losas indicada en la Figura 3.19 se hará un análisis de las deformaciones producidas en una losa de 3x3 por un eje simple dual de 11.0 toneladas. Para la carga ubicada en la esquina bordillo-junta transversal la deformación en la Losa 1 es de 2.12 mm, lo que significaría que para un  $LTE = 50\%$  (en la junta transversal) la deformación en la Losa 4 debería ser 1.06 mm y la deformación total sería de 3.18 mm. Se comprobó que la deformación en la esquina bordillo-junta transversal es de 3.20 mm para una eficiencia en la transferencia de carga nula ( $LTE = 0\%$ ) a través de la junta transversal. Para el caso de la carga ubicada en la esquina junta longitudinal-junta transversal la deformación en la Losa 1 es 1.53 mm, y si la deformación total es de 3.20 mm, significa que la diferencia 1.67 mm debería ser absorbido por la Losa 2, Losa 3 y Losa 4 que convergen en este punto. Se comprobó que la deformación en la Losa 2 es 0.60 mm, en la Losa 3 es 0.38 mm y en la Losa 4 es 0.70 mm, dando un total de 1.68 mm, lo cual significa que en esta esquina la Losa 1 absorbe un 47.66% de la deformación total, la Losa 2 un 18.69%, la Losa 3 un 11.84% y la Losa 4 un 21.81%. La siguiente figura muestra las deformaciones producidas en la Losa 1 y Losa 2.

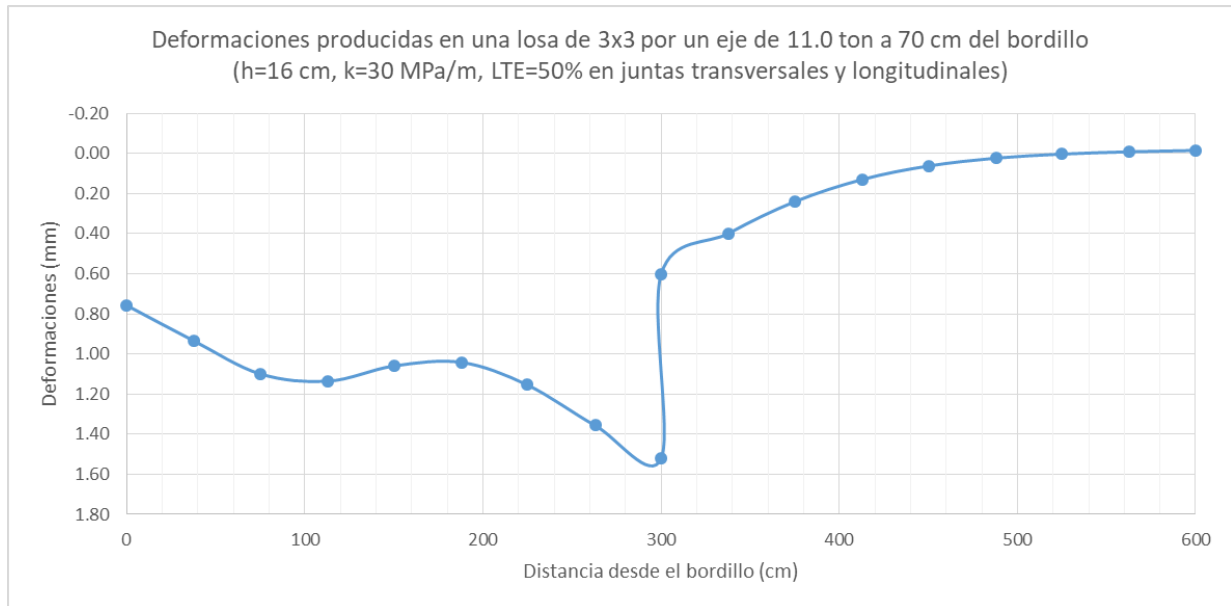


Figura 4.16. Deformaciones producidas en el extremo de la losa para una carga sobre la junta longitudinal

- En el método de la PCA se da un valor a partir del cual el pavimento puede admitir un número infinito de repeticiones de carga sin sufrir daños por fatiga ( $\sigma/S_c < 0.45$ ); esto no ocurre con las ecuaciones desarrolladas para evaluar el daño asociado a las deformaciones que sufren los pavimentos (en las cuales intervienen un sinnúmero de variables), lo que implica que se deben realizar los cálculos respectivos para saber si la magnitud de una deformación puede o no causar el deterioro del pavimento.

#### 4.4.2 Deformaciones en los extremos de las losas por acción del gradiente térmico

En la





Tabla 4.10 se muestran las deformaciones que se producen en el extremo de una losa por acción del gradiente térmico. El signo positivo significa un movimiento hacia abajo (descenso) y el signo negativo representa un movimiento hacia arriba (ascenso).



Tabla 4.10. Deformaciones que se producen en los extremos de las losas por la acción del gradiente térmico

Gradiente térmico (°C)	Losas 2x2			Losas 2.5x2.25			Losas 3x2.5			Losas 3x3			Losas 3x3.5		
	Bordillo (mm)	Centro (mm)	Junta (mm)	Bordillo (mm)	Centro (mm)	Junta (mm)	Bordillo (mm)	Centro (mm)	Junta (mm)	Bordillo (mm)	Centro (mm)	Junta (mm)	Bordillo (mm)	Centro (mm)	Junta (mm)
-6.1	-0.21	-0.06	-0.21	-0.26	-0.08	-0.26	-0.30	-0.10	-0.30	-0.33	-0.09	-0.33	-0.34	-0.10	-0.34
12.2	0.42	0.12	0.42	0.53	0.17	0.53	0.60	0.19	0.60	0.65	0.19	0.65	0.67	0.20	0.67

La Figura 4.17 presenta las deformaciones en varios puntos del extremo de la losa (en la junta transversal) por acción del gradiente térmico. En este caso se han invertido los valores del *eje* y para mostrar en la gráfica lo que realmente ocurre con la deformación de las losas.

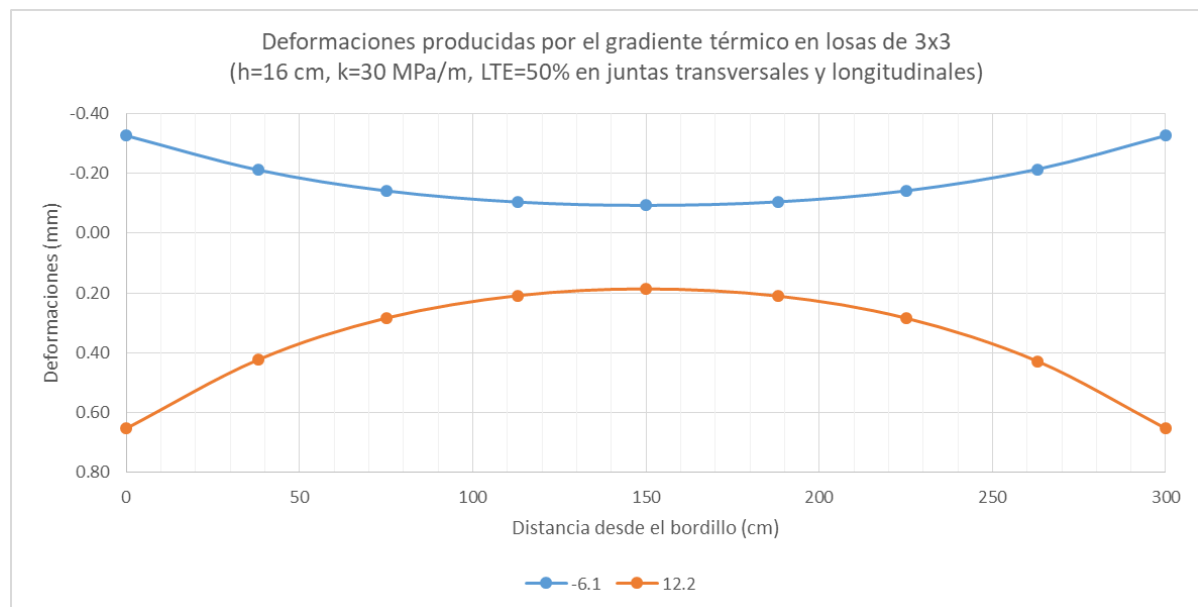


Figura 4.17. Deformaciones por gradiente térmico en el extremo de losa

Del análisis de los resultados mostrados en la tabla y el gráfico anterior se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Tanto para un gradiente térmico negativo como positivo, las mayores deformaciones ocurren en las esquinas de las losas, contrario a lo que sucede con las deformaciones en la mitad de la losa.



- Un gradiente térmico negativo curva las losas hacia arriba y uno positivo curva la losa hacia abajo, pero a diferencia de lo que ocurre con las deformaciones en la mitad de la losa, en este caso solo se produciría la pérdida de contacto entre la losa y su cimentación para un gradiente térmico negativo, tanto en el centro como en las esquinas de la losa, lo que implicaría un incremento de los esfuerzos producidos por las cargas ubicadas en los extremos de las losas (sobre la junta transversal).
- Si comparamos el promedio de las deformaciones producidas en la esquina de la losa (bordillo-junta transversal) por un eje tándem de 20 toneladas (2.23 mm) con el promedio de las deformaciones producidas en este mismo punto por la acción de un gradiente térmico de 12.2 °C (0.57 mm), las primeras son 3.89 veces más grandes; por lo tanto, se podría decir que la magnitud de las deformaciones por gradiente térmico son significativamente menores a las producidas por las cargas vehiculares, pero, serían perjudiciales debido a la pérdida de contacto que podrían generar entre la losa y su cimentación (subbase), incrementando así los esfuerzos producidos por las cargas vehiculares en las losas del pavimento.

#### **4.5 Análisis de sensibilidad de los parámetros utilizados en la modelación**

Considerando que en las vías urbanas de la ciudad de Cuenca existe una mayor posibilidad de que los vehículos circulen sobre la junta longitudinal de construcción que por el borde del pavimento (junto al bordillo), se decidió realizar el análisis de sensibilidad para las dos posiciones de carga mostradas en la Figura 4.18, por ser las que mayores esfuerzos y deformaciones producen. Se consideró una losa de 3x3 y una carga de un eje simple dual de 11 toneladas (los resultados se presentan como anexos).

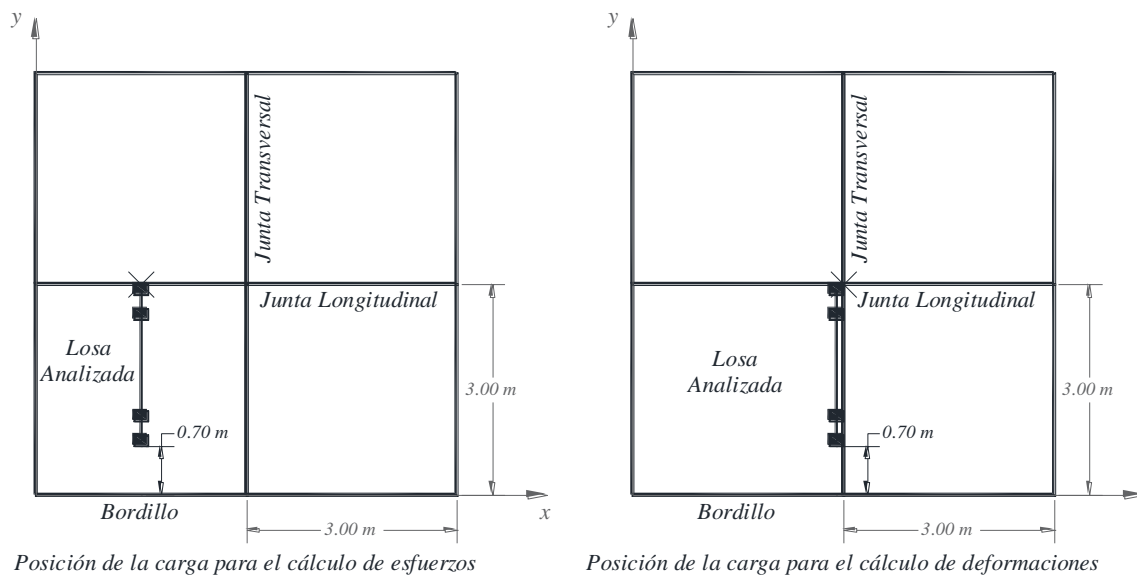


Figura 4.18. Posiciones de carga utilizadas para el análisis de sensibilidad

#### 4.5.1 Análisis de sensibilidad para los esfuerzos de borde

Los siguientes gráficos (Figura 4.19, Figura 4.20, Figura 4.21 y Figura 4.22) presentan los resultados de los esfuerzos de borde (en la junta longitudinal) obtenidos de la modelación para diferentes valores del espesor de losa ( $h$ ), módulo de reacción de la subrasante-subbase ( $k$ ) y la eficiencia en la transferencia de carga en juntas ( $LTE$ ). Utilizando las ecuaciones Ec. (2.3), Ec. (3.10) y Ec. (3.11) se calculó la constante de rigidez de la junta ( $AGG$ ) a partir de los valores de  $h$ ,  $k$  y  $LTE$  correspondientes.

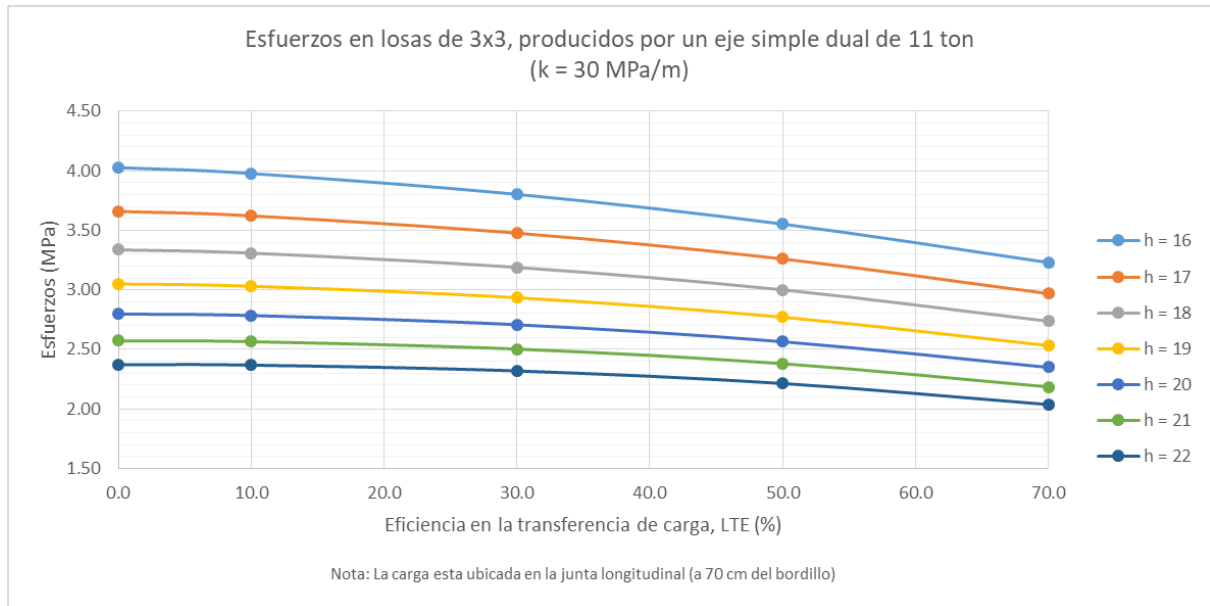


Figura 4.19. Esfuerzos de borde (sobre la junta longitudinal) en losas de 3x3 y un  $k$  de 30 MPa/m

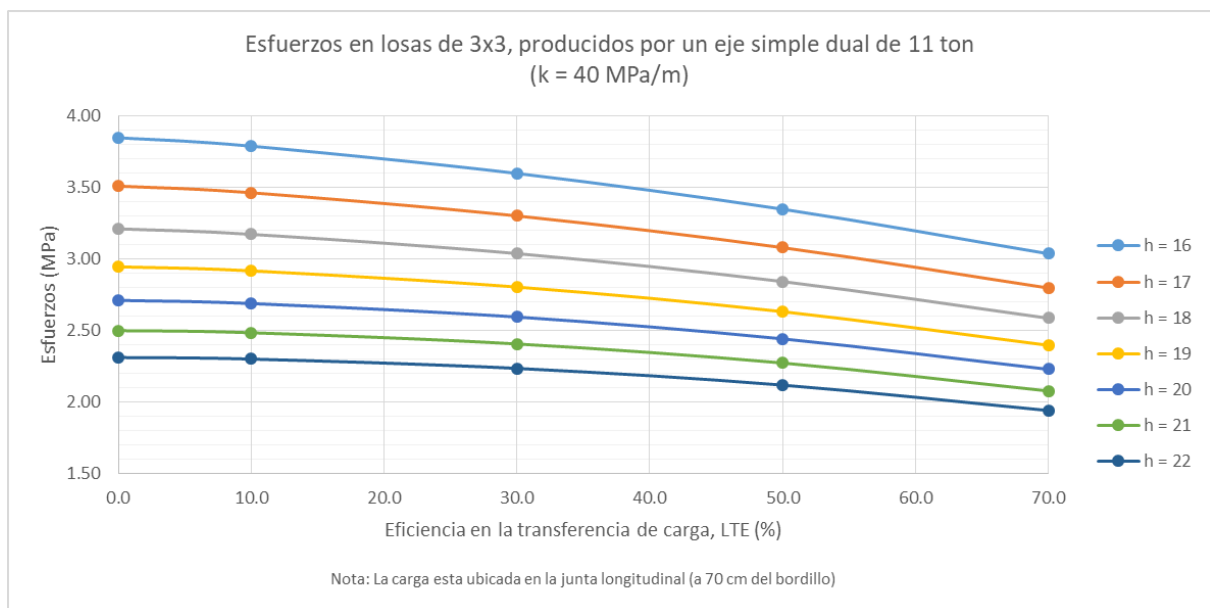


Figura 4.20. Esfuerzos de borde (sobre la junta longitudinal) en losas de 3x3 y un  $k$  de 40 MPa/m

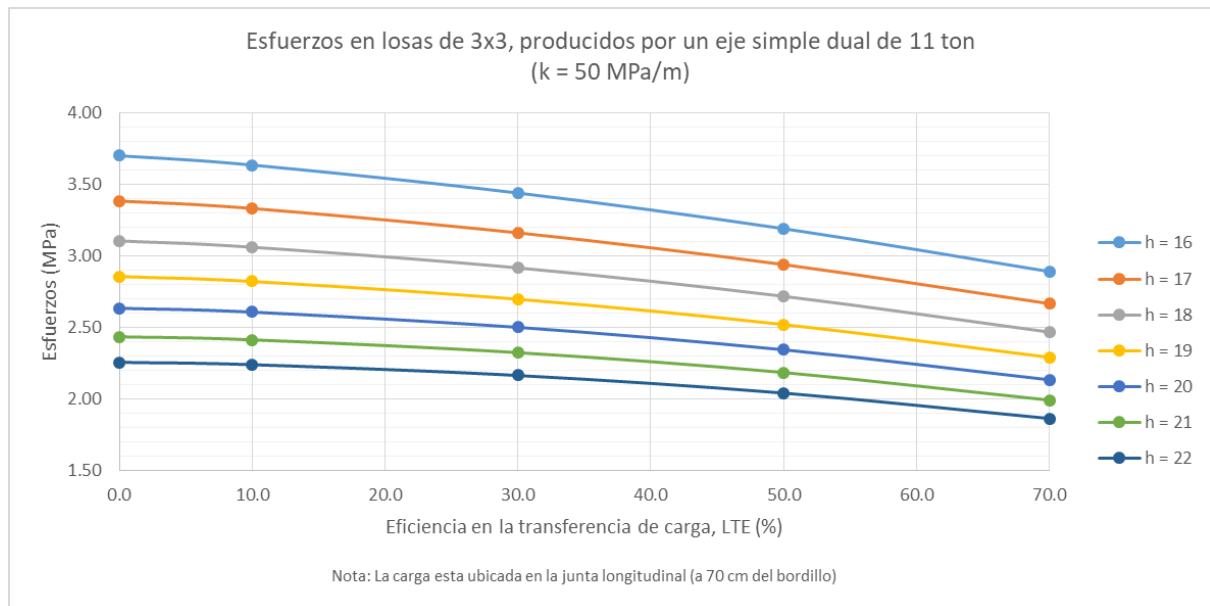


Figura 4.21. Esfuerzos de borde (sobre la junta longitudinal) en losas de 3x3 y un  $k$  de 50 MPa/m

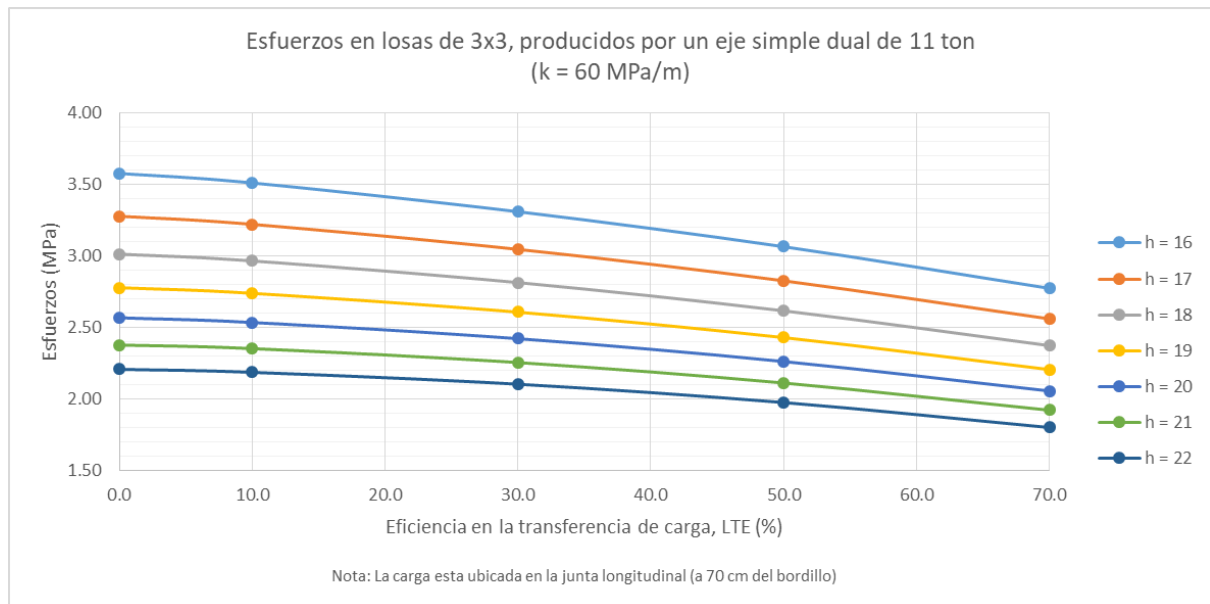


Figura 4.22. Esfuerzos de borde (sobre la junta longitudinal) en losas de 3x3 y un  $k$  de 60 MPa/m



De todos los datos obtenidos del análisis de sensibilidad sobre los esfuerzos, para los diferentes valores de  $k$ , se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Para un 10% de LTE se logra una disminución promedio de esfuerzos del 1.08%; para un 30% de LTE se logra una disminución promedio de esfuerzos del 5.10%; para un 50% de LTE se logra una disminución promedio de esfuerzos del 11.02% y para un 70% de LTE se logra una disminución promedio de esfuerzos del 18.96%.
- Un centímetro (1.00 cm) de aumento en el espesor de la losa produce una disminución promedio de esfuerzos del 7.59%.
- Por cada incremento de 10 MPa/m en el valor de  $k$  se logra una disminución promedio de esfuerzos del 3.80%

#### **4.5.2 Análisis de sensibilidad para las deformaciones de esquina**

Los siguientes gráficos ( Figura 4.23, Figura 4.24, Figura 4.25 y Figura 4.26) presentan los resultados de las deformaciones de esquina (junta longitudinal-junta transversal) obtenidos de la modelación para diferentes valores del espesor de losa ( $h$ ), módulo de reacción de la subrasante-subbase ( $k$ ) y la eficiencia en la transferencia de carga en juntas ( $LTE$ ). Al igual que en análisis de esfuerzos, la constante de rigidez de la junta ( $AGG$ ) se calculó para los valores de  $h$ ,  $k$  y  $LTE$  correspondientes.

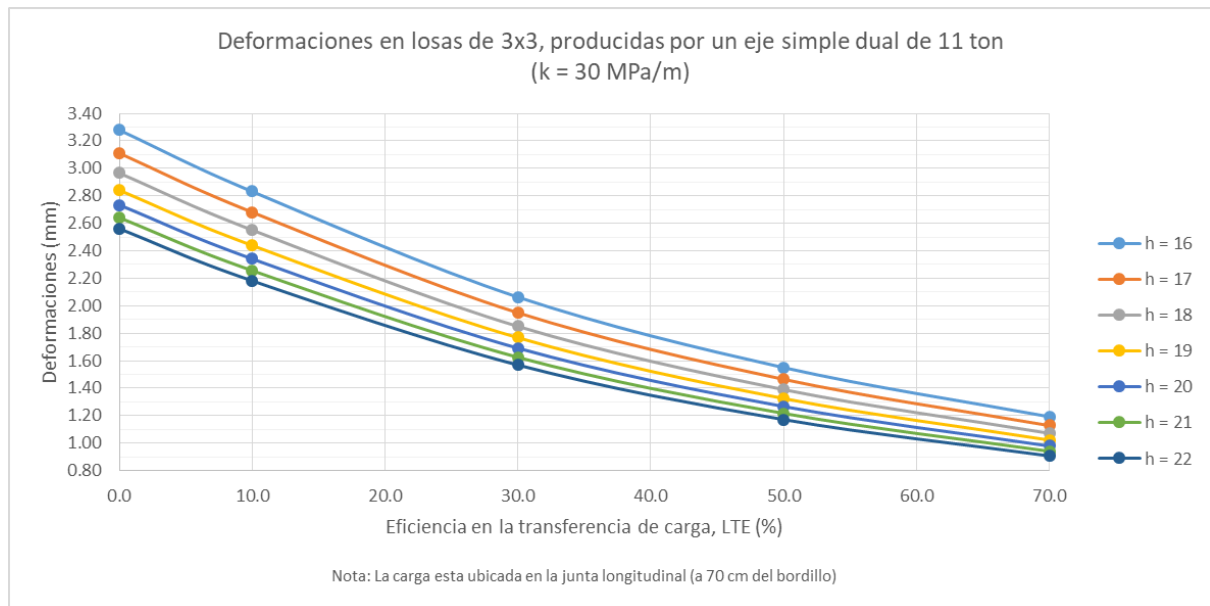


Figura 4.23. Deformaciones de esquina (junta longitudinal-junta transversal) en losas de 3x3 y un  $k$  de 30 MPa/m

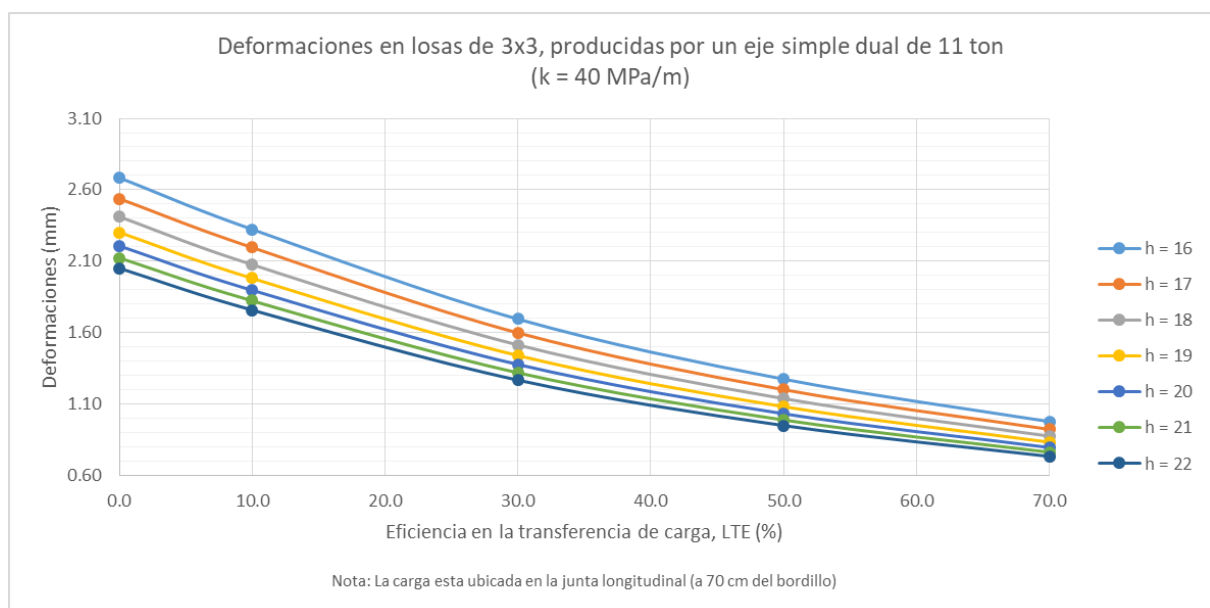


Figura 4.24. Deformaciones de esquina (junta longitudinal-junta transversal) en losas de 3x3 y un  $k$  de 40 MPa/m



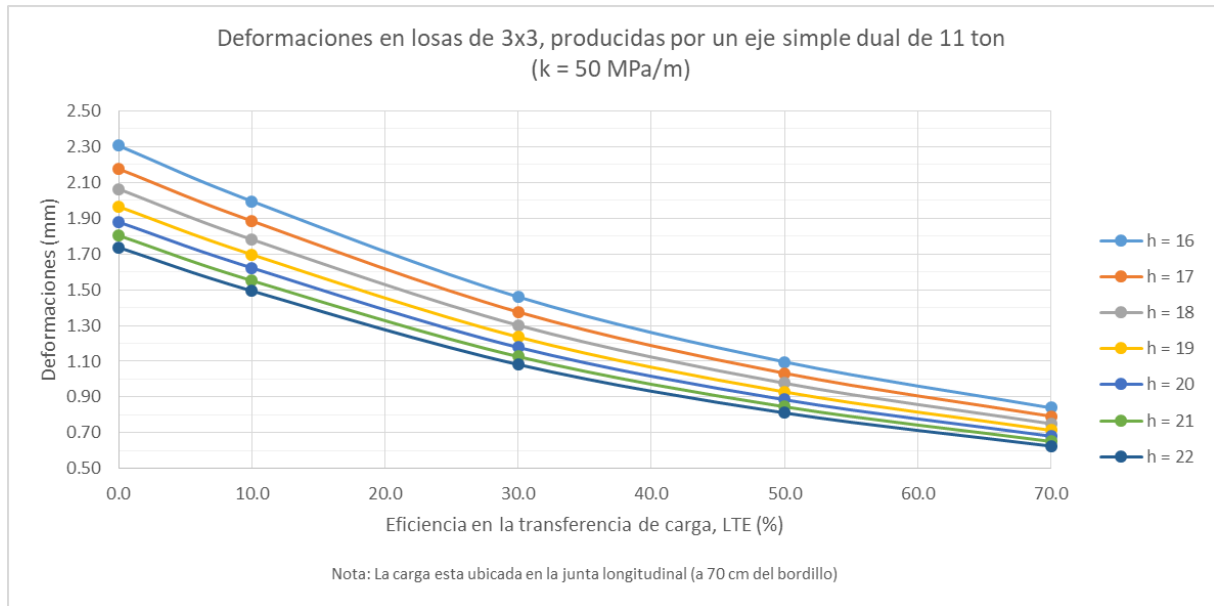


Figura 4.25. Deformaciones de esquina (junta longitudinal-junta transversal) en losas de 3x3 y un  $k$  de 50 MPa/m

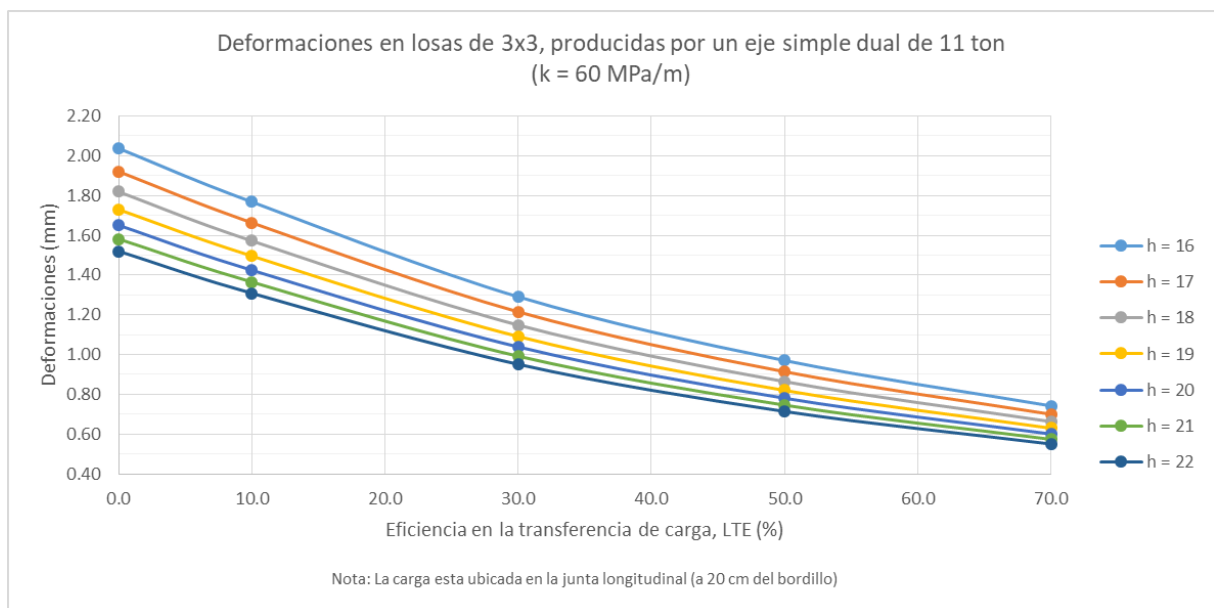


Figura 4.26. Deformaciones de esquina (junta longitudinal-junta transversal) en losas de 3x3 y un  $k$  de 60 MPa/m

De todos los datos obtenidos del análisis de sensibilidad sobre las deformaciones, para los diferentes valores de  $k$ , se pueden hacer las siguientes observaciones:



- Para un 10% de LTE se logra una disminución promedio de deformaciones del 13.82%, para un 30% de LTE se logra una disminución promedio de deformaciones del 37.35%, para un 50% de LTE se logra una disminución promedio de deformaciones del 52.96% y para un 70% de LTE se logra una disminución promedio de deformaciones del 63.79%.
- Un centímetro (1.00 cm) de aumento en el espesor de la losa produce una disminución promedio de deformaciones del 4.65%.
- Por cada incremento de 10 MPa/m en el valor de  $k$  se logra una disminución promedio de deformaciones del 14.94%

#### **4.6 Determinación de espesores de losa utilizando funciones de transferencia de deterioro con los resultados obtenidos en la modelación**

Los diseños mecanicistas-empíricos relacionan el deterioro de pavimentos rígidos con: 1) el agrietamiento de losas por fatiga del concreto provocada por los esfuerzos de borde, y 2) el escalonamiento de losas por erosión del material donde se apoyan (subbase) provocado por las deformaciones en las juntas del pavimento. Estos dos modelos de deterioro se relacionan con un tercero que causa la pérdida de regularidad superficial del pavimento (IRI), el cual afecta la seguridad y confort durante la conducción.

Los modelos de deterioro o funciones de transferencia permiten calcular el número permisible de repeticiones de carga para evitar daños en la estructura de un pavimento. Su uso demanda una calibración previa y gran cantidad de información sobre varios parámetros considerados durante su desarrollo y que están fuera del alcance de este trabajo. Por tal razón, se aplicará únicamente los modelos de deterioro desarrollados por la PCA para la estimación



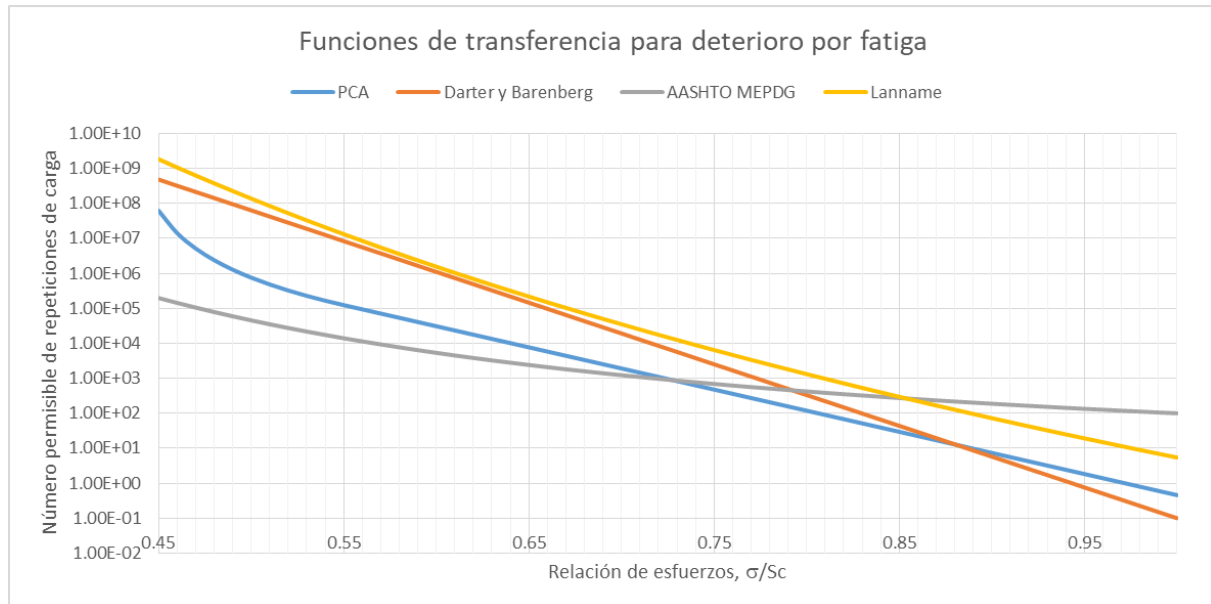
de espesores. Otros modelos de deterioro y herramientas de evaluación de desempeño de pavimentos serán citados solo con fines informativos.

#### **4.6.1 Análisis del espesor requerido por fatiga**

La Figura 4.27 muestra el número permisible de repeticiones de carga ( $N_f$ ) obtenidas de las funciones de transferencia desarrolladas por la PCA (Packard, 1984), Darter y Barenberg (Huang, 2004b), ME-PDG (AASHTO, 2008), y Lanname (Vargas, 2016). En la



Tabla 4.11 se indican las ecuaciones respectivas de estas funciones de transferencia.



*Figura 4.27. Funciones de transferencia para calcular el número de repeticiones de carga permisibles por fatiga*



Tabla 4.11. Funciones de transferencia (Modelos de deterioro para el agrietamiento por fatiga)

Autor	Ecuación
PCA (Portland Cement Asosiation)  (Packard, 1984)	$\log N_f = 11.737 - 12.077 \frac{\sigma}{S_c} \quad \text{para } \frac{\sigma}{S_c} \geq 0.55$ $N_f = \left( \frac{4.2577}{\frac{\sigma}{S_c} - 0.4325} \right)^{3.268} \quad \text{para } 0.45 < \frac{\sigma}{S_c} \leq 0.55$ $N_f = \text{Ilimitado} \quad \text{para } \frac{\sigma}{S_c} \leq 0.55$
Darter y Barenberg  (Huang, 2004b)	$\log N_f = 16.61 - 17.61 \frac{\sigma}{S_c}$
AASHTO ME-PDG  (AASHTO, 2008)	$\log N_f = 2 \left( \frac{S_c}{\sigma} \right)^{1.22}$
Lanname (Universidad de Costa Rica)  (Vargas, 2016)	$\log N_f = \log 5.451 - 24.6 \log \frac{\sigma}{S_c}$

En este análisis, los esfuerzos ( $\sigma$ ) a utilizarse en la función de transferencia desarrollada por la PCA, son los esfuerzos de borde obtenidos de la modelación en KenSlabs, producidos por cargas ubicadas en la mitad de una losa de 3x3 sobre la junta longitudinal de construcción, multiplicado por un factor de reducción de esfuerzo ( $f_3 = 0.894$ ) obtenido de la Figura 3.15, y que considera el porcentaje de camiones que circulan por los bordes de la vías (6%). El método de la PCA no considera esfuerzos combinados por carga y gradiente



térmico, por lo que el análisis también se lo hará únicamente para los esfuerzos producidos por cargas vehiculares.

Se consideró un valor de  $k = 40 \text{ MPa/m}$ , un LTE del 50% en juntas transversales (sin pasadores) y un LTE del 70% en juntas longitudinales (juntas de construcción con varillas de amarre en losas confinadas lateralmente), tanto para vías colectoras como locales.

Además, se asumió un módulo de elasticidad del concreto  $E_c = 21232 \text{ MPa}$  ( $216506 \text{ kg/cm}^2$ ) y un módulo de rotura del concreto  $Sc = 3.53 \text{ MPa}$  ( $36.0 \text{ kg/cm}^2$ ). El número permisible de repeticiones de carga fue calculado con la ecuación  $E_c$ . (2.20) y el número pronosticado de repeticiones de carga por eje durante el período de diseño ( $n_f$ ) igual a los calculados en la Tabla 3.11.

El espesor de la losa se determinó de tal manera que el daño relativo  $Dr = n_f / N_f$  sea menor que 1. Del análisis se obtuvo un espesor mínimo de losa  $h = 20.5 \text{ cm}$  para vías colectoras y un espesor mínimo  $h = 19.5 \text{ cm}$  para vías locales, cuyos resultados se muestran en las Tabla 4.12 y Tabla 4.13 respectivamente.

Tabla 4.12. Esfuerzos y daño por fatiga en losas de 3x3 y 20.5 cm de espesor por tráfico de vías colectoras

<b>Cálculo de esfuerzos y daño relativo en losas de 3x3 y 20.5 cm de espesor para tráfico de vías colectoras</b>									
<b>Peso del eje (tn)</b>	<b>Tipo de eje</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>	<b><math>f_3</math></b>	<b><math>\sigma</math> (MPa)</b>	<b>Sc (MPa)</b>	<b><math>\sigma / Sc</math></b>	<b><math>N_f</math></b>	<b><math>n_f</math></b>	<b><math>D_r</math></b>
1.0	Simple	0.28	0.894	0.25	3.53	0.071	Ilimitado	8.25E+06	0.00
2.5	Simple	0.71	0.894	0.63	3.53	0.178	Ilimitado	8.25E+06	0.00
3.0	Simple	0.85	0.894	0.76	3.53	0.215	Ilimitado	1.34E+05	0.00
3.9	Simple	1.08	0.894	0.96	3.53	0.272	Ilimitado	1.76E+05	0.00
6.0	Simple	1.66	0.894	1.48	3.53	0.419	Ilimitado	1.89E+05	0.00
7.0	Simple Dual	1.37	0.894	1.22	3.53	0.346	Ilimitado	1.34E+05	0.00
9.2	Simple Dual	1.80	0.894	1.61	3.53	0.456	2.40E+07	1.76E+05	0.01
11.0	Simple Dual	2.15	0.894	1.92	3.53	0.544	1.48E+05	1.43E+05	0.97
20.0	Tándem	1.43	0.894	1.28	3.53	0.363	Ilimitado	6.01E+04	0.00
								<b>TOTAL <math>D_r</math></b>	<b>0.98</b>



Tabla 4.13. Esfuerzos y daño por fatiga en losas de 3x3 y 19.5 cm de espesor por tráfico de vías locales

Cálculo de esfuerzos y daño relativo en losas de 3x3 y 19.5 cm de espesor para tráfico de vías locales									
Peso del eje (tn)	Tipo de eje	Esfuerzo	$f_3$	$\sigma$	Sc	$\sigma / Sc$	$N_f$	$n_f$	$D_r$
1.0	Simple	0.30	0.894	0.27	3.53	0.076	Ilimitado	5.58E+06	0.00
2.5	Simple	0.76	0.894	0.68	3.53	0.193	Ilimitado	5.58E+06	0.00
3.0	Simple	0.91	0.894	0.82	3.53	0.232	Ilimitado	5.08E+04	0.00
3.9	Simple	1.16	0.894	1.04	3.53	0.295	Ilimitado	1.34E+05	0.00
6.0	Simple	1.79	0.894	1.60	3.53	0.453	3.74E+07	1.06E+05	0.00
7.0	Simple Dual	1.47	0.894	1.31	3.53	0.371	Ilimitado	5.08E+04	0.00
9.2	Simple Dual	1.93	0.894	1.73	3.53	0.490	1.29E+06	1.34E+05	0.10
11.0	Simple Dual	2.31	0.894	2.06	3.53	0.584	4.83E+04	4.62E+04	0.96
20.0	Tándem	1.55	0.894	1.38	3.53	0.391	Ilimitado	6.01E+04	0.00
TOTAL $D_r$									1.06

Del análisis de los datos mostrados en las tablas anteriores se puede ver que el mayor porcentaje del consumo por fatiga (prácticamente la totalidad) es producida por el eje simple dual de 11 toneladas, mientras que el resto de ejes no causarían ningún daño ( $D_r = 0$ ), por lo que el diseño de los espesores de losas en estos dos casos (vías colectoras y locales) está determinado por los esfuerzos y el número de repeticiones de ejes simples duales de 11.0 toneladas.

Realizando un análisis similar, pero considerando únicamente los esfuerzos y un número de repeticiones de carga pronosticada de un eje equivalente de 8.2 ton, los espesores de losa disminuyen en aproximadamente 1.5 cm tanto para vías locales como colectoras.

#### 4.6.2 Análisis del espesor requerido por erosión

La Figura 4.28 muestra el número permisible de repeticiones de carga ( $N_e$ ) obtenidas de las funciones de transferencia desarrolladas por la PCA para el deterioro por erosión. En la Tabla 4.14 se indican las ecuaciones respectivas de la función de transferencia de la PCA para el deterioro por erosión.

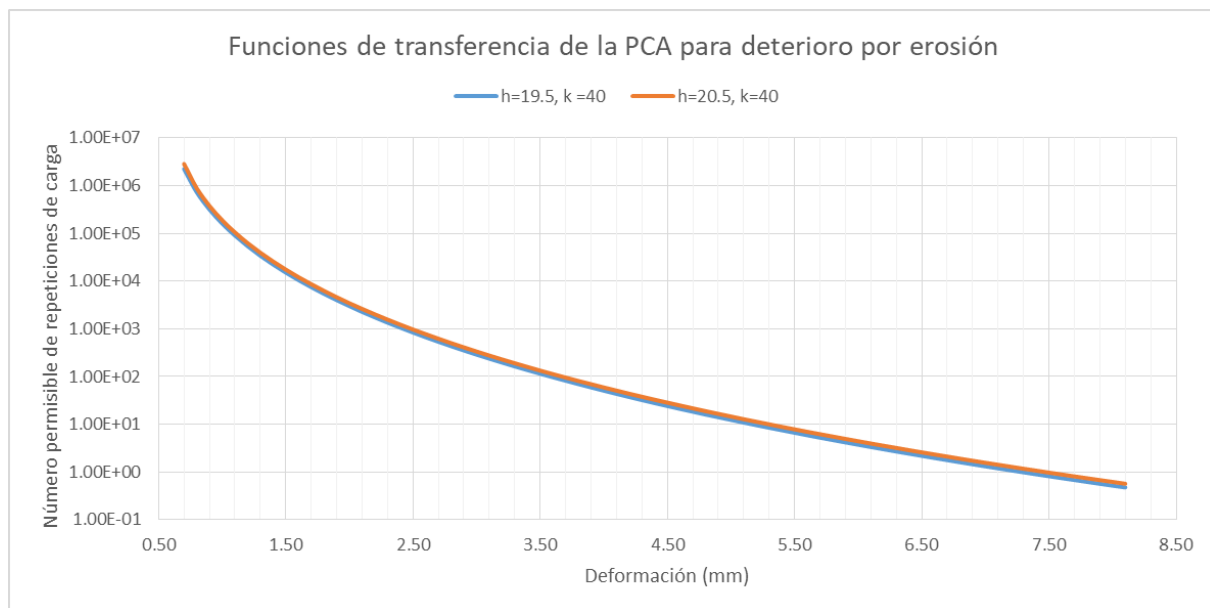


Figura 4.28. Funciones de transferencia para calcular el número de repeticiones de carga permisibles por erosión

Tabla 4.14. Funciones de transferencia o modelo de deterioro por erosión de la PCA (Packard, 1984)

Autor	Ecuación
PCA	$\log N_e = 14.524 - 6.777 (C_1 P - 9.0)^{0.103}$
(Portland Cement Asosiacion)	$P = 268.7 \frac{p^2}{h k^{0.73}}$
(Packard, 1984)	$p = k w$
	$\text{Porcentaje de daño por erosión} = 100 \sum_{i=1}^m \frac{C_2 n_i}{N_i}$

Donde:

$C_1$  = Factor de ajuste, igual a 1.0 para subbases no tratadas y 0.9 para subbases estabilizadas

$p$  = Presión sobre la cimentación bajo la esquina de la losa =  $k w$  en psi

$h$  = Espesor de la losa en pulgadas

$k$  = Módulo de rección de la subrasante-subbase en pci





---

$C_2$  = Factor de ajuste, igual a 0.06 para losas sin espaldones de concreto y 0.94 con espaldones

---

En este análisis, las deformaciones ( $w$ ) a utilizarse en la función de transferencia desarrollada por la PCA, son las deformaciones de esquina producidos por cargas ubicadas en la esquina junta longitudinal-junta transversal de una losa de 3x3.

Los valores de  $C_1$  y  $C_2$  son 1.0 y 0.94 respectivamente. Se consideró un valor de  $k = 40$  MPa/m, un LTE del 50% en juntas transversales (sin pasadores) y un LTE del 70% en longitudinales (juntas de construcción con varillas de amarre en losas confinadas lateralmente), tanto para vías colectoras como locales.

El número pronosticado de repeticiones de carga por eje durante el período de diseño ( $n_e$ ) son los indicados en la Tabla 3.11.

El espesor de la losa debe ser tal que el porcentaje de daño por erosión sea menor que 100.

Con los espesores de losas obtenidos del análisis por fatiga ( $h=20.5$  cm para vías colectoras y  $h=19.5$  para vías locales) se realizó el cálculo del daño por erosión cuyos resultados se muestran en las



Tabla 4.15 y Tabla 4.16 respectivamente.



Tabla 4.15. Deformaciones y daño por erosión en losas de 3x3 y 20.5 cm de espesor por tráfico de vías colectoras

<b>Cálculo de deformaciones y daño relativo en losas de 3x3 y 20.5 cm de espesor para tráfico de vías colectoras</b>							
<b>Peso del eje (tn)</b>	<b>Tipo de eje</b>	<b>Deformación (mm)</b>	<b>p (MPa)</b>	<b>P f(p,h,k)</b>	<b>N<sub>e</sub></b>	<b>n<sub>e</sub></b>	<b>Daño (%)</b>
1.0	Simple	0.10	0.004	0.288	Ilimitado	8.25E+06	0.00
2.5	Simple	0.25	0.010	1.797	Ilimitado	8.25E+06	0.00
3.0	Simple	0.30	0.012	2.588	Ilimitado	1.34E+05	0.00
3.9	Simple	0.36	0.014	3.842	Ilimitado	1.76E+05	0.00
6.0	Simple	0.56	0.022	9.092	1.67E+09	1.89E+05	0.01
7.0	Simple Dual	0.56	0.022	9.225	5.16E+08	1.34E+05	0.02
9.2	Simple Dual	0.74	0.029	15.934	1.78E+06	1.76E+05	9.26
11.0	Simple Dual	0.88	0.035	22.779	4.41E+05	1.43E+05	30.51
20.0	Tándem	0.89	0.036	23.521	3.95E+05	6.01E+04	14.29
TOTAL Dr							54.10

Tabla 4.16. Deformaciones y daño por erosión en losas de 3x3 y 19.5 cm de espesor por tráfico de vías locales

<b>Cálculo de deformaciones y daño relativo en losas de 3x3 y 19.5 cm de espesor para tráfico de vías locales</b>							
<b>Peso del eje (tn)</b>	<b>Tipo de eje</b>	<b>Deformación (mm)</b>	<b>p (MPa)</b>	<b>P f(p,h,k)</b>	<b>N<sub>e</sub></b>	<b>n<sub>e</sub></b>	<b>Daño (%)</b>
1.0	Simple	0.10	0.004	0.334	Ilimitado	5.58E+06	0.00
2.5	Simple	0.26	0.010	2.089	Ilimitado	5.58E+06	0.00
3.0	Simple	0.31	0.012	3.009	Ilimitado	5.08E+04	0.00
3.9	Simple	0.38	0.015	4.503	Ilimitado	1.34E+05	0.00
6.0	Simple	0.59	0.023	10.659	2.42E+07	1.06E+05	0.41
7.0	Simple Dual	0.59	0.023	10.635	2.48E+07	5.08E+04	0.19
9.2	Simple Dual	0.77	0.031	18.370	9.78E+05	1.34E+05	12.87
11.0	Simple Dual	0.92	0.037	26.262	2.73E+05	4.62E+04	15.91
20.0	Tándem	0.92	0.037	26.473	2.66E+05	6.01E+04	21.23
TOTAL Dr							50.62

Del análisis de los datos mostrados en las tablas anteriores se puede ver que los ejes con un peso menor a 6.0 toneladas no causarían daño por erosión ( $Dr = 0$ ). El porcentaje total de consumo por erosión en los dos casos no supera el 55%, por lo que se puede decir que el espesor del pavimento para el tráfico que soportan las vías colectoras y locales está regido por los esfuerzos y el deterioro por fatiga que puedan causar sobre las losas del pavimento.



Realizando un análisis similar con los espesores de losas obtenidos del análisis por fatiga de un eje equivalente de 8.2 ton, el daño por erosión es aproximadamente del 89 y 77%, para vías colectoras y locales respectivamente.

#### **4.6.3 Análisis para vías arteriales**

Un análisis similar, tanto por fatiga como por erosión, se realizó para vías arteriales. Se calcularon los esfuerzos y deformaciones para losas de 3x3.5, y se utilizaron valores de  $k = 40$  MPa/m,  $LTE = 70\%$  en juntas transversales (con pasadores) y  $LTE = 70\%$  en juntas longitudinales (juntas de construcción con varillas de amarre en losas confinadas lateralmente). El peso del eje de carga fue mayorado por un factor de seguridad de 1.2, y los esfuerzos calculados se multiplicaron por un factor de reducción  $f_3$  de 0.894 que considera un 6% de camiones circulando por los bordes de la losa (junta longitudinal). El espesor de losa requerido fue de 22 cm, con un porcentaje de consumo por fatiga al final de la vida útil del 87.35% y un 16.60% por erosión. Cabe indicar que es necesario el uso de pasadores para garantizar una mayor transferencia de cargas entre losas, puesto que con un LTE del 50% en juntas transversales, el porcentaje del daño causado por erosión supera el 100%.

#### **4.7 Evaluación del desempeño de la estructura del pavimento utilizando modelos de deterioro por fatiga con los resultados obtenidos**

En los métodos actuales para el diseño de pavimentos, como son los mecanicistas-empíricos, existe la posibilidad de evaluar el desempeño de una estructura de pavimento propuesta. Estos métodos, a más de una calibración previa de los modelos de deterioro que utilizan, requieren de una gran cantidad de información propia de cada proyecto para obtener resultados adecuados. Las diferentes variables inmersas durante la evaluación de un diseño, requieren de cientos de cálculos, lo cual solo es posible con la ayuda de software creados con



este fin. En este trabajo, en base a los esfuerzos obtenidos durante la modelación y los espesores calculados, se realizó una evaluación del desempeño por fatiga de las losas de pavimento con la ayuda de programa ME-CR Rigid 1.0 (Vargas, 2016). La evaluación fue hecha únicamente para vías locales y colectoras, de las cuales se dispone información actualizada de los tipos de vehículos y cargas por eje considerados en el diseño. Para algunos parámetros requeridos en el software y de los que no se dispone información en nuestro medio, se consideró los valores usuales sugeridos en el programa. En la evaluación se consideró únicamente el deterioro que causan los esfuerzos producidos por un eje simple dual de 11.0 toneladas sobre el borde de la losa (en la junta longitudinal de construcción), por ser los que generan casi la totalidad del daño relativo. Las Figura 4.29 y Figura 4.30 muestran las capturas de pantalla de los resultados de la evaluación realizada para vías colectoras con el modelo de deterioro de la ME-PDG (AASHTO 2008) y de Lanname (Universidad de Costa Rica).

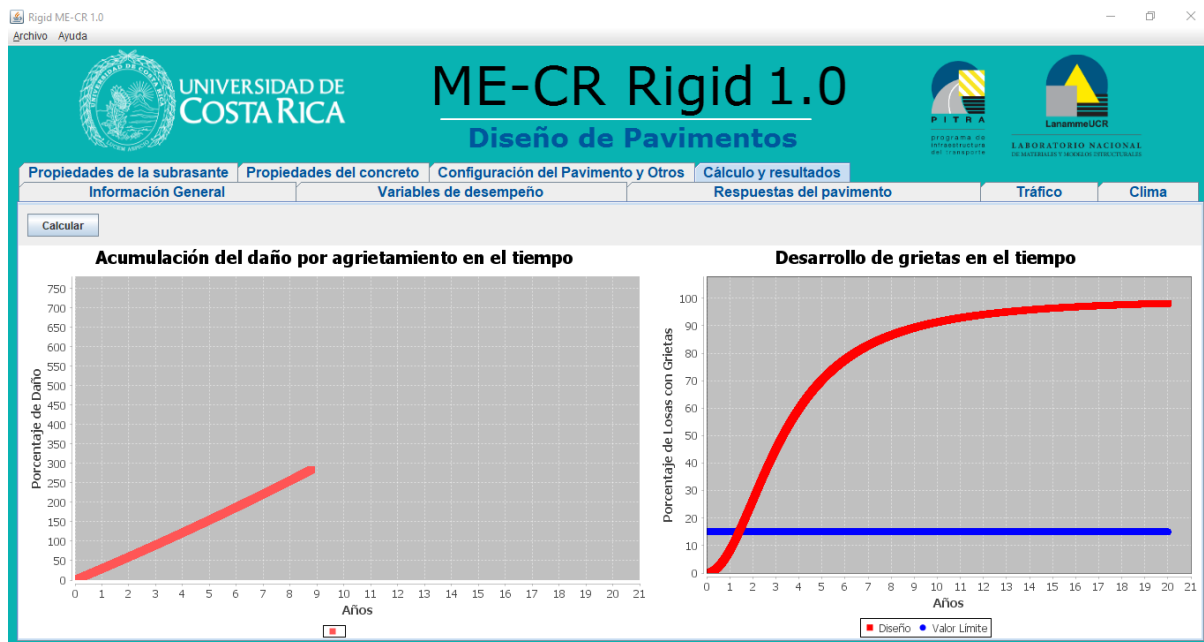


Figura 4.29. Resultados para el desempeño de vías colectoras con el modelo de deterioro de la ME-PDG (AASHTO 2008)

Fuente: (Vargas, 2016)

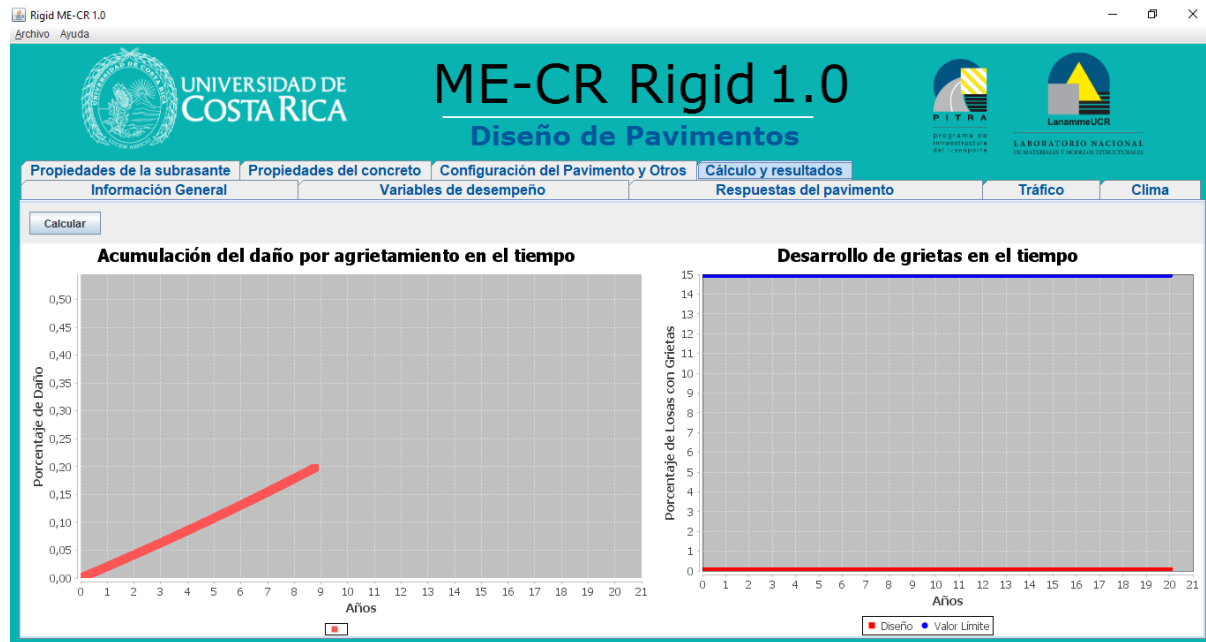


Figura 4.30. Resultados para el desempeño de vías colectoras con el modelo de deterioro de Lanname  
(Universidad de Costa Rica)

Fuente: (Vargas, 2016)

Si se analizan los gráficos anteriores, se puede apreciar que el desarrollo de grietas en el tiempo es muy diferente si se utiliza el modelo de deterioro de la ME-PDG o el de la Universidad de Costa Rica. En el primer caso el desarrollo de grietas superaría el valor límite del 15% sugerido por el software para este tipo de vías en apenas 1.5 años, lo que significaría que el diseño propuesto no es válido; mientras que para el segundo caso no se desarrollarían grietas durante todo el periodo de diseño (20 años) y podríamos estar con un diseño muy conservador y por lo tanto costoso.

Resultados que produzcan un valor cercano al límite establecido como aceptable para el agrietamiento transversal (15%), al final del periodo de diseño (20 años), se consiguen con un espesor de 23.0 cm, con el modelo de deterioro de la ME-PDG, y 18.0 cm, con el modelo de Lanamme, para vías colectoras; y con un espesor de 21.0 cm y 17.0 cm, respectivamente, para el caso de vías locales. Los espesores calculados con las ecuaciones de transferencia de la PCA, proporcionan valores similares al promedio de estos espesores.



## 5 Conclusiones y Recomendaciones

### 5.1 Conclusiones

- De la información recopilada para este estudio, tanto en los diseños, como en los métodos constructivos, se pudo establecer que las calzadas de las vías urbanas, que actualmente se construyen con pavimento rígido en la ciudad de Cuenca, están formadas por losas (o paños), cuya mayor longitud no excede de 24 veces el espesor de la losa. La relación lado mayor / lado menor de una losa varía entre 1.0 y 1.2, con una dimensión máxima de losas de 3.50 m. Esta geometría de carriles de circulación formados por losas pequeñas (de 2x2, 2.5x2.25, 3x2.5, 3x3 y 3x3.5 m de largo x ancho), evita que se produzcan esfuerzos de tracción en la superficie de la losa por la acción de más de un eje de carga sobre una misma losa, así como, incrementos considerables en la magnitud de los esfuerzos producidos por el gradiente térmico, a medida que crece el tamaño de las losas. Se determinó que los esfuerzos en losas de 3x3 son 3.5 veces mayores a los producidos en losas de 2x2; además, se pudo ver que las deformaciones producidas por gradiente térmico, podrían generar la pérdida de contacto entre la losa y la cimentación.
- Se observó en los procesos constructivos, que las estructuras de pavimento, están formadas por una losa de concreto hidráulico, apoyada sobre una capa intermedia de material (generalmente subbase), colocada sobre la subrasante natural o mejorada (con material de lastre o pedraplén en zonas inestables). De la información obtenida para la modelación, se determinó que las vías analizadas tienen un CBR de diseño de subrasante del 4.2%, y un  $k_{combinado}$  (subrasante-subbase) de 42.5 MPa/m, en



promedio. Del análisis de sensibilidad, se determinó que un incremento de 10 MPa/m en el valor del  $k_{combinado}$ , produce una reducción promedio del esfuerzo de borde del 3.80%, y del 14.94% en las deformaciones de esquina (junta longitudinal-junta transversal).

- Utilizando los esfuerzos y deformaciones calculadas en la modelación, y aplicando las en las ecuaciones desarrolladas por la PCA, se determinó que: el espesor de losa requerido para soportar las cargas de tráfico es de 22.0 cm para vías arteriales, 20.5 cm para vías colectoras y 19.5 para vías locales. Comprando con los espesores de losas contemplados en los diseños (22.0 cm para vías arteriales, 19.0, 20.0 y 21.0 cm para vías colectoras y 16.0 y 17.0 cm para vías locales) se puede ver que la mayor diferencia se presenta en las vías locales. Además, se pudo observar que para el tráfico pronosticado en vías colectoras y locales, el diseño del pavimento está regido por los esfuerzos y el deterioro por fatiga, donde el módulo de rotura del pavimento juega un papel preponderante. Del análisis de sensibilidad se determinó que con un incremento de 1.0 cm en el espesor de la losa, se logra una reducción promedio del esfuerzo de borde del 7.59%, y un 4.65% en las deformaciones de esquina (junta longitudinal-junta transversal).
- En los procesos constructivos de vías colectoras y locales, se observó que las losas que conforman la calzada del pavimento poseen juntas longitudinales con barras de unión o amarre, y juntas transversales sin elementos de transmisión de cargas (pasadores), lo que implica que la transferencia de carga, está dada únicamente por la trabazón de agregados. Del análisis de sensibilidad se determinó que con una





eficiencia en la transferencia de carga del 50%, se reduce en promedio el esfuerzo de borde en un 11.02% y un 52.96% en las deformaciones de esquina (junta longitudinal-junta transversal).

- Del análisis de las respuestas mecánicas de las losas de pavimento obtenidas durante la modelación, para diferentes posiciones de las cargas, se determinó que los mayores esfuerzos y deformaciones, son producidos por cargas ubicadas en el borde de la losa (junto al bordillo, donde se ha considerado la mínima eficiencia en la transferencia de cargas  $LTE=0$ ). A medida que las cargas se alejan del bordillo, la magnitud de los esfuerzos y deformaciones disminuye considerablemente. Si los esfuerzos de borde no superan el 50% del valor del módulo de rotura, y aplicando el criterio de la PCA, significaría que no causan daño por fatiga; por lo tanto, resulta indispensable conocer la ubicación o distribución lateral de las cargas. En base a esto, si se considera las estructuras laterales de confinamiento en vías urbanas, y que evitan que las cargas circulen cerca al bordillo, podrían volverse críticos los esfuerzos y deformaciones en otros puntos donde existe mayor probabilidad de que circulen las cargas, como es el caso de los ejes ubicados sobre las juntas longitudinales de construcción, que podrían causar agrietamiento transversal y deterioros por erosión; mientras que los ejes de carga ubicados en el centro de las losas sobre la junta transversal, podrían causar agrietamiento longitudinal. En casos la eficiencia en la transferencia de carga es determinante en la magnitud de las respuestas mecánicas obtenidas. Se pudo establecer que los mayores esfuerzos de borde y deformaciones de esquina, para cargas que circulan sobre la junta longitudinal de construcción, son producidos por un eje simple dual de 11.0 toneladas.



## 5.2 Recomendaciones

- Si bien es cierto que las respuestas mecánicas de los pavimentos rígidos, pueden ser obtenidas de manera relativamente fácil con la ayuda de software disponible para el efecto, su utilización en el diseño y desempeño de pavimentos, es limitado en nuestro medio mientras no se disponga de información necesaria, adecuada y precisa sobre los datos de entrada, que permitan obtener resultados que reflejen el comportamiento real de las estructuras de pavimento, para poder ser utilizados en los métodos mecanicistas-empíricos. Para esto será necesario realizar estudios específicos de tráfico (variación horaria, variación mensual, espectros de cargas, distribución lateral del tráfico, etc.) y de gradientes térmicos a los que están expuestas las losas de pavimento bajo las condiciones locales (magnitud y frecuencia con las que se presentan), así como, estudios para establecer la eficiencia en la transferencia de carga en juntas, módulos de reacción de la subrasante-subbase (variaciones estacionales que éstos pueden sufrir), ganancia de resistencia del concreto con el tiempo, erodibilidad de capas de cimentación, entre otros; que no solo están relacionados con las propiedades de los materiales utilizados en la construcción de las estructuras de pavimento, sino también, con las características constructivas, efectos medio ambientales y funcionalidad de la vía, y que pueden variar significativamente incluso dentro de una misma vía analizada
  
- Los modelos de deterioro que permiten evaluar el desempeño del pavimento, requieren información obtenida en campo de las fallas producidas en las estructuras de pavimentos, de tal forma que permitan desarrollar ecuaciones de predicción del deterioro en base a curvas de ajuste. Esta información no existe en nuestro medio, por



lo que sería necesario, iniciar programas de recopilación de datos estadísticos sobre el deterioro que pueden sufrir la gran cantidad de pavimentos, relativamente nuevos, que se existen en nuestra ciudad.

- En cuanto a la construcción de pavimentos, se podría recomendar el uso de concretos con un mayor módulo de rotura (más resistentes), dada la importancia que este tiene sobre los deterioros por fatiga que pueden sufrir las losas. Del mismo modo, es recomendable el uso de capas de subbase de granulometría adecuada (con bajos porcentajes de finos), y que contribuyan a incrementar el módulo de reacción subrasante-subbase disminuyendo así la deformación y evitando los deterioros por erosión en la estructura del pavimento. Además, si se considera que los esfuerzos críticos se producen en las juntas del pavimento, resulta necesario utilizar elementos que permitan mejorar o mantener la eficiencia en la transferencia de carga en juntas (como estructuras de confinamiento lateral del pavimento, barras de amarre, pasadores, concretos con granulometrías y áridos triturados, que favorezcan la trabazón de agregados). En cuanto a la geometría de las losas, se debe diseñar considerando los ejes pesados que circulan por los puntos críticos (bordes y centro de las losas), donde se producen los mayores esfuerzos y deformaciones por cargas y/o gradiente térmico.



## 6 Lista de referencias

AASHTO. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993*. AASHTO.

AASHTO. (2008). *Mechanistic-empirical pavement design guide: a manual of practice*.

Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.

Chang, C., Vidal, J., Loria, L., Bustos, M., & Delgadillo, R. (2013). Aplicabilidad del Método Mecanístico-Empírico de Diseño de Pavimentos (MEPDG) AASHTO 2008 en Latinoamérica. En *Memorias del: XVII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto*. Guatemala.

Davis, W. (2003). EverFE Theory Manual, Software for the 3D Finite Element Analysis of Jointed Plain Concrete Pavements.

El Telégrafo. (2015, junio 28). La Municipalidad inicia nueva fase del programa Barrio Para Mejor Vivir [Sitio de Noticias]. Recuperado de <http://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/regional-sur/1/la-municipalidad-inicia-nueva-fase-del-programa-barrio-para-mejor-vivir>

FHWA. (2003). Evaluation of Joint and Crack Load Transfer, Final Report. Recuperado de <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltpp/reports/02088/02088.pdf>

GAD Municipal de Cuenca. (2015a). Plan de Movilidad 2015-2025 [Portal Web]. Recuperado de <http://www.cuenca.gob.ec/?q=content/plan-de-movilidad>

GAD Municipal de Cuenca. (2015b). Plan de Movilidad y Espacios Públicos 2015-2025.

Garnica, P., & Correa, Á. (2004). Conceptos mecanicistas en pavimentos.

Hernández López, F. (2013). *Estado del conocimiento en la modelación de pavimentos rígidos (modelos de respuesta)*. <https://doi.org/10.13140/2.1.3396.7685>



- Huang, Y. H. (2004a). *KENPAVE, Computer package for pavement analysis and design*.
- Huang, Y. H. (2004b). *Pavement analysis and design* (2nd ed). Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall.
- Ioannides, A. M., Thompson, M. R., & Barenberg, E. J. (1985). Westergaard solutions reconsidered. *Transportation research record*, 1043, 13–23.
- Lee, Y.-H., & Carpenter, S. H. (2001). PCAWIN Program for Jointed Concrete Pavement Design. *Tamkang Journal of Science and Engineering*, 4(4), 293-300.
- Ménendez, J., H. Mélenz, J., & E. Monge, J. (2015). Diseño Mecánico-Empírico de Pavimentos de Concreto con juntas para Esfuerzo Combinados.  
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3173.2245>
- MTOP. (2013). *Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12-MTOP* (Vol. 2B). Quito.
- NCHRP. (2003a). MEPDG Appendix JJ: Transverse joint faulting model. Recuperado de [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/mepdg/2appendices\\_JJ.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/mepdg/2appendices_JJ.pdf)
- NCHRP. (2003b). MEPDG Appendix KK: Transverse cracking of JPCP. Recuperado de [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/mepdg/2appendices\\_KK.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/mepdg/2appendices_KK.pdf)
- Packard, R. G. (1984). *Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements*. Portland Cement Association.
- Vargas, L. (2016). ME-CR Rigid (Versión 1.0). Laboratorio nacional de materiales y modelos estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR).
- Vivanco, E. (2016). *Caracterización del tránsito de vehículos pesados aplicando la metodología MEPDG-AASHTO 2008; aplicación en pavimento de concreto hidráulico-Lima*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Peru.



## 7 Anexos

Tabla 7.1. Comparación entre los resultados de la modelación en KenSlabs y los obtenidos con las fórmulas de Westergaard para un eje simple dual de 11.0 toneladas.

<b>Resultados obtenidos en KenSalabs</b>		
Eje (ton) =	11.0	Eje simple dual
$E_c$ (MPa) =	21232	Módulo elástico del concreto
$h$ (m) =	0.16	Espesor de losa
$\nu$ =	0.15	Relación de Poisson
$k$ (MPa/m) =	30	Módulo de reacción de la subrasante
Peso del eje (MN) =	0.108	Peso del eje de carga
Nro de neumáticos =	4	Nro de neumaticos del eje
$P$ (MN) =	0.027	Carga sobre un neumático
Área de contacto (m) =	0.21 x 0.15	Área de contacto neumático-losa
Presión de contacto (Mpa) =	0.856	Área equivalente de contacto
$\sigma_c$ (Mpa) =	2.28	Esfuerzo de esquina (promedio)
$\sigma_i$ (Mpa) =	2.16	Esfuerzo interior (promedio)
$\sigma_e$ (Mpa) =	3.88	Esfuerzo de borde (promedio)
$\Delta_c$ (mm) =	3.09	Deformación en esquina (promedio)
$\Delta_i$ (mm) =	0.48	Deformación en el interior (promedio)
$\Delta_e$ (mm) =	1.27	Deformación en borde (promedio)

<b>Resultados obtenidos con fórmulas de Westergaard</b>		
Eje (ton) =	11.0	Eje simple dual
$E_c$ (MPa) =	21232	Módulo elástico del concreto
$h$ (m) =	0.16	Espesor de losa
$\nu$ =	0.15	Relación de Poisson
$k$ (MPa/m) =	30	Módulo de reacción de la subrasante
$\ell$ (m) =	0.705	Radio de rigidez relativa
Peso del eje (MN) =	0.108	Peso del eje de carga
$P$ (MN) =	0.054	Carga sobre un set de neumáticos duales
$a$ (m) =	0.150	Área de contacto neumático-losa
$a_{eq}$ (m) =	0.198	Área equivalente de contacto
$\sigma_c$ (Mpa) =	2.50	Esfuerzo de esquina (Ec. 2.7)
$\sigma_i$ (Mpa) =	2.24	Esfuerzo interior (Ec. 2.9a)
$\sigma_e$ (Mpa) =	3.99	Esfuerzo de borde (Ec. 2.11)
$\Delta_c$ (mm) =	3.42	Deformación en esquina (Ec. 2.8)
$\Delta_i$ (mm) =	0.44	Deformación en el interior (Ec. 2.10)
$\Delta_e$ (mm) =	1.29	Deformación en borde (Ec. 2.11)



Tabla 7.2. Comparación entre los resultados de la modelación en KenSlabs y los obtenidos con las cartas de Bradbury para un gradiente térmico de 12.2°C

<b>Resultados obtenidos en KenPave</b>		
Tamaño de losas (m)	3x3	Largo x Ancho
$E_c$ (MPa) =	21232	Módulo elástico del concreto
$h$ (m) =	0.16	Espesor de losa
$\nu$ =	0.15	Relación de Poisson
$k$ (MPa/m)=	30	Módulo de reacción de la subrasante
$\Delta t$ (°C) =	12.2	Gradiente térmico
$\alpha t$ (/°C) =	9.00E-06	Coefficiente de expansión térmica
$\sigma_i$ (Mpa) =	0.72	Esfuerzo interior (promedio)
$\sigma_e$ (Mpa) =	0.63	Esfuerzo de borde (promedio)

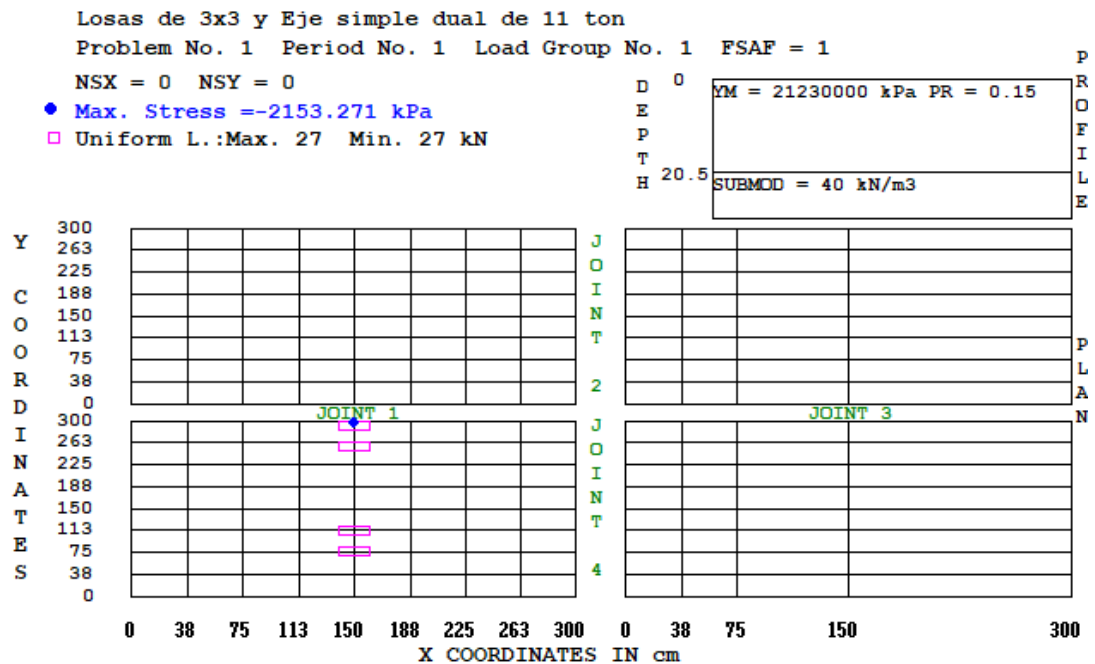
  

<b>Resultados obtenidos con cartas de Bradbury</b>		
Tamaño de losas (m)	3x3	Largo x Ancho
$E_c$ (MPa) =	21232	Módulo elástico del concreto
$h$ (m) =	0.16	Espesor de losa
$\nu$ =	0.15	Relación de Poisson
$k$ (MPa/m)=	30	Módulo de reacción de la subrasante
$\Delta t$ (°C) =	12.2	Gradiente térmico
$\alpha t$ (/°C) =	9.00E-06	Coefficiente de expansión térmica
$\sigma_i$ (Mpa) =	0.77	Esfuerzo interior
$\sigma_e$ (Mpa) =	0.65	Esfuerzo de borde

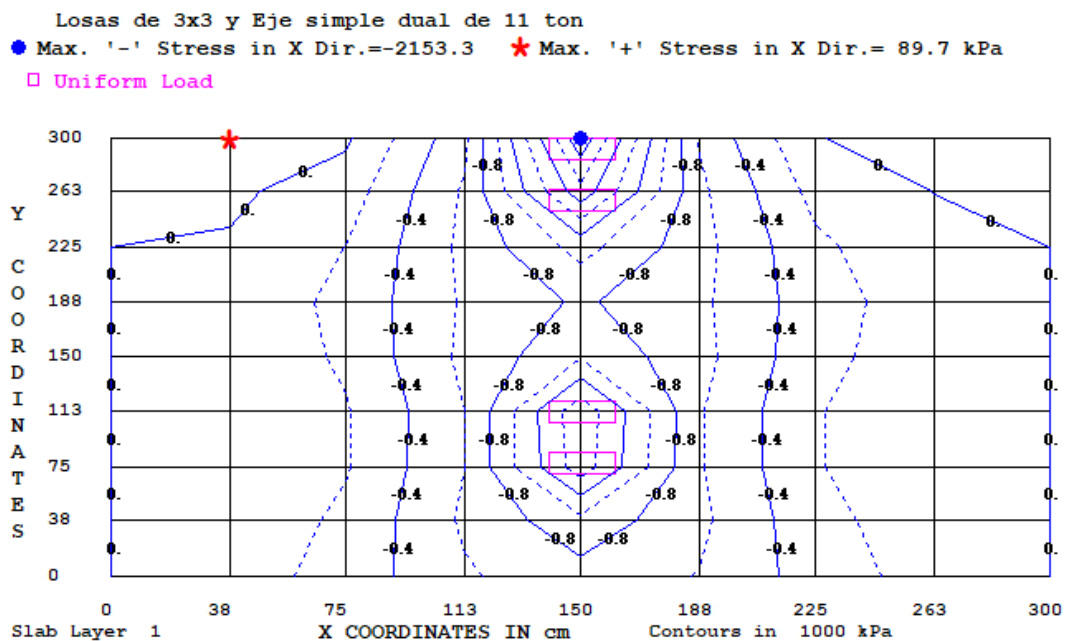


Figura 7.1. Capturas de pantalla de los resultados obtenidos en KenSlabs durante la modelación de un eje simple dual de 11.0 toneladas en la mitad de una losa de 3x3 sobre la junta longitudinal

Graph for KENSLABS



PROBLEM 1, STRESSES IN X DIRECTION

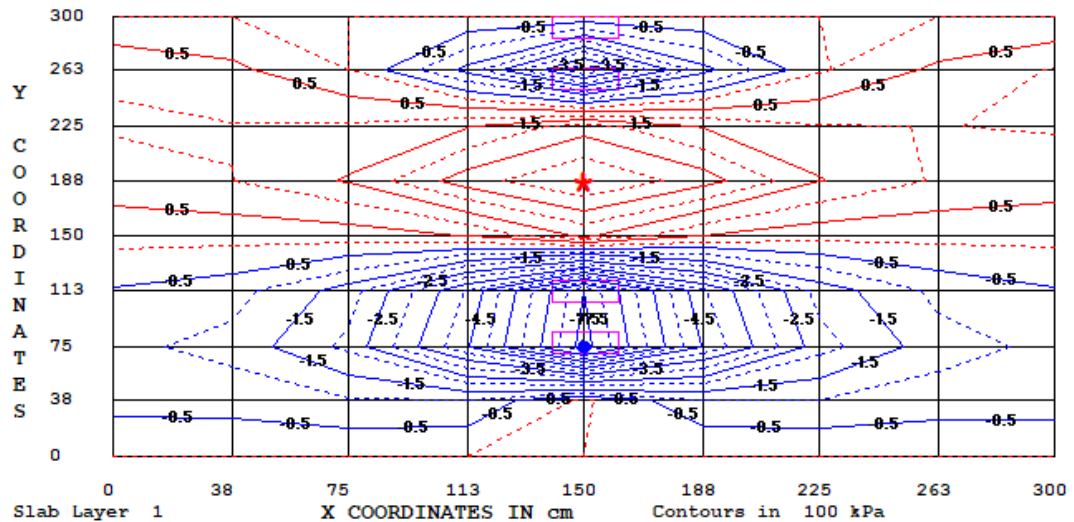






PROBLEM 1, STRESSES IN Y DIRECTION

Losas de 3x3 y Eje simple dual de 11 ton  
 • Max. '-' Stress in Y Dir.=-771.3    ★ Max. '+' Stress in Y Dir.= 352 kPa  
 □ Uniform Load



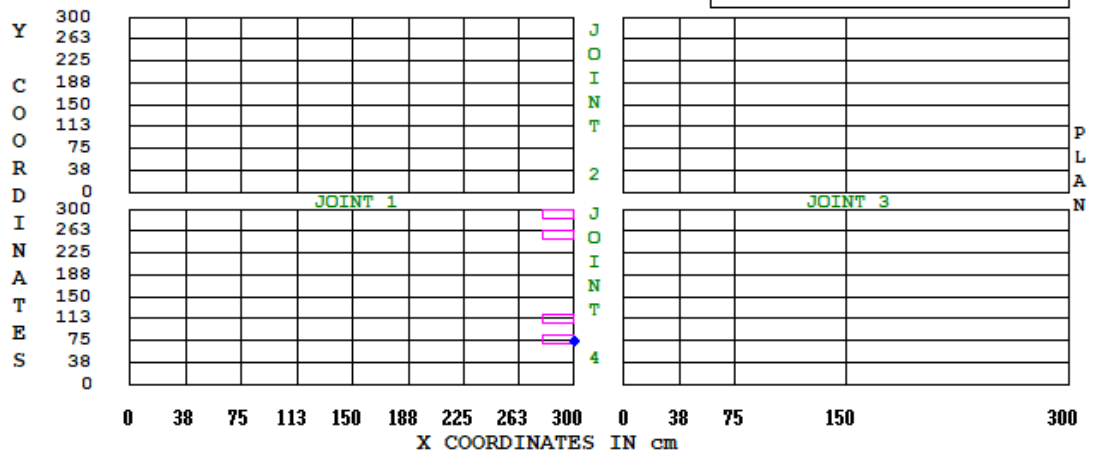
Graph for KENSLABS

Losas de 3x3 y Eje simple dual de 11 ton  
 Problem No. 1 Period No. 1 Load Group No. 1 FSAF = 1

NSX = 0 NSY = 0

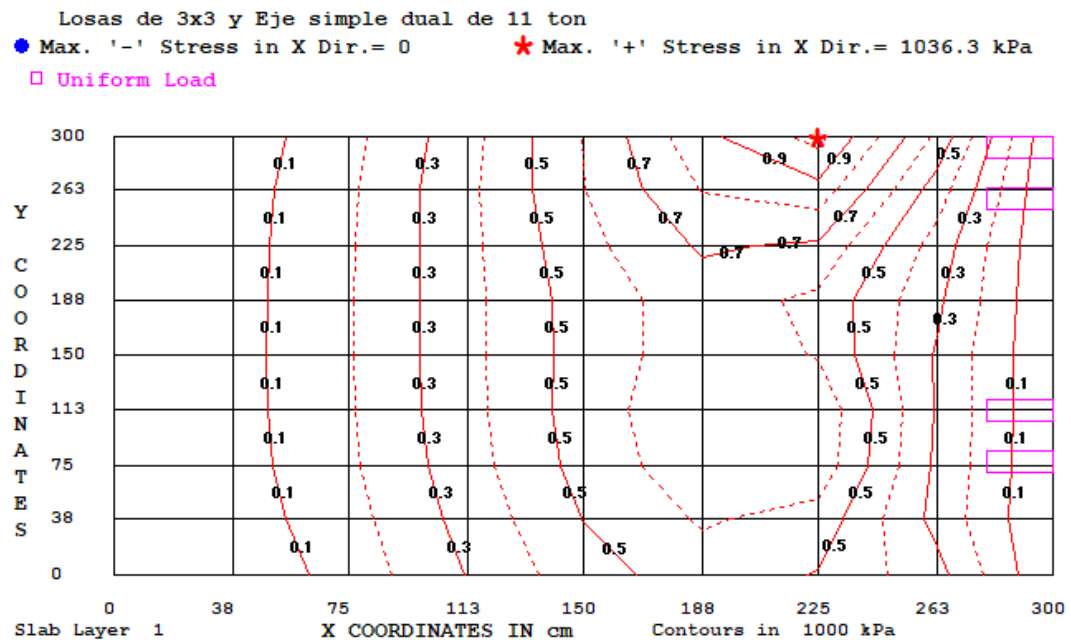
• Max. Stress =-1361.675 kPa  
 □ Uniform L.:Max. 27 Min. 27 kN

D 0  
 E  
 P  
 T  
 H 20.5  
 YM = 21230000 kPa PR = 0.15  
 SUBMOD = 40 kN/m3

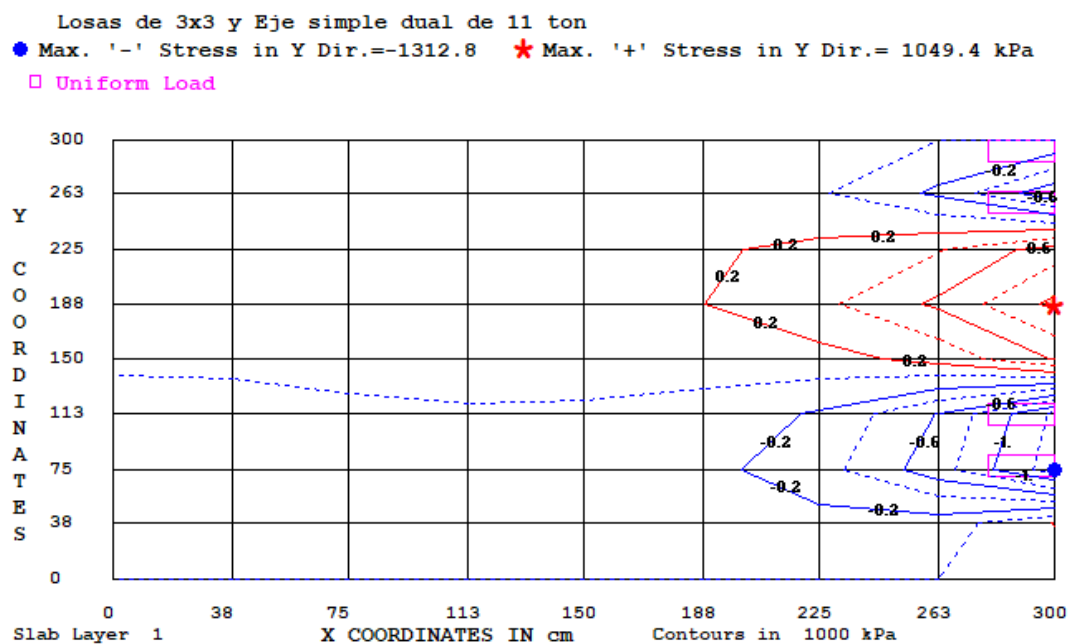




PROBLEM 1, STRESSES IN X DIRECTION



PROBLEM 1, STRESSES IN Y DIRECTION





ComprobacionCE: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

DEFLECTIONS OF SLABS (F) ARE: (DOWNWARD POSITIVE)

1	-0.01568	2	-0.01435	3	-0.01328	4	-0.01242	5	-0.01171
6	-0.01093	7	-0.00996	8	-0.00869	9	-0.00727	10	-0.01260
11	-0.01112	12	-0.00992	13	-0.00899	14	-0.00825	15	-0.00748
16	-0.00655	17	-0.00535	18	-0.00401	19	-0.00936	20	-0.00757
21	-0.00618	22	-0.00516	23	-0.00442	24	-0.00369	25	-0.00283
26	-0.00171	27	-0.00050	28	-0.00505	29	-0.00275	30	-0.00106
31	0.00009	32	0.00081	33	0.00145	34	0.00222	35	0.00325
36	0.00431	37	0.00108	38	0.00411	39	0.00626	40	0.00757
41	0.00822	42	0.00873	43	0.00945	44	0.01044	45	0.01137
46	0.01031	47	0.01443	48	0.01732	49	0.01883	50	0.01927
51	0.01960	52	0.02041	53	0.02163	54	0.02263	55	0.02266
56	0.02831	57	0.03235	58	0.03407	59	0.03394	60	0.03394
61	0.03527	62	0.03741	63	0.03904	64	0.03847	65	0.04608
66	0.05207	67	0.05400	68	0.05249	69	0.05188	70	0.05442
71	0.05879	72	0.06196	73	0.05576	74	0.06525	75	0.07383
76	0.07594	77	0.07217	78	0.07071	79	0.07497	80	0.08267
81	0.08788	82	-0.00564	83	-0.00569	84	-0.00558	85	-0.00527
86	-0.00483	87	-0.00433	88	-0.00390	89	-0.00358	90	-0.00339
91	-0.00258	92	-0.00305	93	-0.00343	94	-0.00364	95	-0.00364
96	-0.00351	97	-0.00335	98	-0.00321	99	-0.00313	100	0.00110
101	-0.00008	102	-0.00116	103	-0.00200	104	-0.00251	105	-0.00276
106	-0.00287	107	-0.00293	108	-0.00300	109	0.00623	110	0.00381
111	0.00164	112	-0.00011	113	-0.00128	114	-0.00201	115	-0.00243
116	-0.00272	117	-0.00298	118	0.01303	119	0.00878	120	0.00506
121	0.00208	122	0.00009	123	-0.00120	124	-0.00197	125	-0.00251
126	-0.00298	127	0.02204	128	0.01515	129	0.00931	130	0.00478
131	0.00177	132	-0.00018	133	-0.00136	134	-0.00218	135	-0.00287
136	0.03221	137	0.02217	138	0.01396	139	0.00774	140	0.00367
141	0.00103	142	-0.00055	143	-0.00166	144	-0.00255	145	0.04259
146	0.02937	147	0.01883	148	0.01096	149	0.00583	150	0.00250
151	0.00049	152	-0.00087	153	-0.00194	154	0.05126	155	0.03572



Tabla 7.3. Esfuerzos obtenidos del análisis de sensibilidad

Esfuerzos en losas de 3x3, producidos por un eje simple dual de 11 ton y k = 30 MPa/m (en MPa)							
LTE (%)	Espesores de losa (cm)						
	h = 16	h = 17	h = 18	h = 19	h = 20	h = 21	h = 22
0	4.03	3.66	3.34	3.05	2.80	2.57	2.37
10	3.98	3.62	3.31	3.03	2.78	2.57	2.37
30	3.80	3.48	3.19	2.93	2.71	2.50	2.32
50	3.55	3.26	3.00	2.77	2.57	2.38	2.21
70	3.23	2.97	2.74	2.53	2.35	2.19	2.04

Esfuerzos en losas de 3x3, producidos por un eje simple dual de 11 ton y k = 40 MPa/m (en MPa)							
LTE (%)	Espesores de losa (cm)						
	h = 16	h = 17	h = 18	h = 19	h = 20	h = 21	h = 22
0	3.85	3.51	3.21	2.95	2.71	2.50	2.31
10	3.79	3.46	3.17	2.92	2.69	2.49	2.30
30	3.60	3.30	3.04	2.81	2.60	2.41	2.24
50	3.35	3.08	2.84	2.63	2.44	2.27	2.12
70	3.04	2.80	2.59	2.40	2.23	2.08	1.94

Esfuerzos en losas de 3x3, producidos por un eje simple dual de 11 ton y k = 50 MPa/m (en MPa)							
LTE (%)	Espesores de losa (cm)						
	h = 16	h = 17	h = 18	h = 19	h = 20	h = 21	h = 22
0	3.70	3.39	3.11	2.86	2.64	2.44	2.26
10	3.64	3.33	3.06	2.82	2.61	2.41	2.24
30	3.44	3.16	2.92	2.70	2.50	2.33	2.17
50	3.19	2.94	2.72	2.52	2.34	2.19	2.04
70	2.89	2.67	2.47	2.29	2.14	1.99	1.86

Esfuerzos en losas de 3x3, producidos por un eje simple dual de 11 ton y k = 60 MPa/m (en MPa)							
LTE (%)	Espesores de losa (cm)						
	h = 16	h = 17	h = 18	h = 19	h = 20	h = 21	h = 22
0	3.58	3.28	3.01	2.78	2.57	2.38	2.21
10	3.51	3.22	2.97	2.74	2.54	2.35	2.19
30	3.31	3.05	2.82	2.61	2.42	2.26	2.10
50	3.07	2.83	2.62	2.43	2.26	2.11	1.98
70	2.78	2.56	2.37	2.21	2.06	1.92	1.80



Tabla 7.4. Deformaciones obtenidas del análisis de sensibilidad

Deformaciones en losas de 3x3, producidos por un eje simple dual de 11 ton y $k = 30$ MPa/m (en mm)							
LTE (%)	Espesores de losa (cm)						
	h = 16	h = 17	h = 18	h = 19	h = 20	h = 21	h = 22
0	3.28	3.11	2.97	2.84	2.73	2.64	2.56
10	2.83	2.68	2.55	2.44	2.34	2.26	2.18
30	2.06	1.95	1.85	1.77	1.69	1.62	1.57
50	1.55	1.46	1.39	1.33	1.27	1.22	1.17
70	1.19	1.13	1.07	1.02	0.98	0.94	0.91

Deformaciones en losas de 3x3, producidos por un eje simple dual de 11 ton y $k = 40$ MPa/m (en mm)							
LTE (%)	Espesores de losa (cm)						
	h = 16	h = 17	h = 18	h = 19	h = 20	h = 21	h = 22
0	2.68	2.54	2.41	2.30	2.21	2.12	2.05
10	2.32	2.20	2.08	1.98	1.90	1.82	1.76
30	1.70	1.60	1.51	1.44	1.38	1.32	1.27
50	1.28	1.20	1.14	1.08	1.03	0.99	0.95
70	0.98	0.92	0.88	0.83	0.80	0.76	0.73

Deformaciones en losas de 3x3, producidos por un eje simple dual de 11 ton y $k = 50$ MPa/m (en mm)							
LTE (%)	Espesores de losa (cm)						
	h = 16	h = 17	h = 18	h = 19	h = 20	h = 21	h = 22
0	2.30	2.18	2.06	1.96	1.88	1.80	1.74
10	2.00	1.88	1.78	1.70	1.62	1.55	1.49
30	1.46	1.38	1.30	1.24	1.18	1.13	1.08
50	1.10	1.03	0.98	0.93	0.89	0.85	0.81
70	0.84	0.79	0.75	0.71	0.68	0.65	0.63

Deformaciones en losas de 3x3, producidos por un eje simple dual de 11 ton y $k = 60$ MPa/m (en mm)							
LTE (%)	Espesores de losa (cm)						
	h = 16	h = 17	h = 18	h = 19	h = 20	h = 21	h = 22
0	2.04	1.92	1.82	1.73	1.65	1.58	1.52
10	1.77	1.66	1.57	1.50	1.42	1.37	1.31
30	1.29	1.22	1.15	1.09	1.04	0.99	0.95
50	0.97	0.91	0.86	0.82	0.78	0.75	0.71
70	0.74	0.70	0.66	0.63	0.60	0.57	0.55